

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie

Vliv drátu na kvalitu a produktivitu svařování MAG s vysokou hustotou výkonu.

Wire effect on the quality and productivity of high power density MAG welding.

Radovan Peška

KSP-SM-563

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zdeněk Hudec, Ph.D. – TU v Liberci

Konzultant diplomové práce: Ing. David Hrstka – TU v Liberci

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 77

Počet tabulek: 26

Počet příloh: 8

Počet obrázků: 56

Datum: 5.1.2011

originální zadání

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: M2301 - Strojní inženýrství
Diplomant: Radovan Peška
Téma práce: **Vliv drátu na kvalitu a produktivitu svařování MAG s vysokou hustotou výkonu.**
Wire effect on the quality and productivity of high power density MAG welding.
Číslo DP: KSP-SM-563
Vedoucí DP: Ing. Zdeněk Hudec, Ph.D. – TU v Liberci
Konzultant: Ing. David Hrstka – TU v Liberci

Abstrakt:

Diplomová práce navazuje na předchozí práce optimalizace svařování MAG soustavy zdroj-drát-plyn pomocí algoritmu matematického výpočtu efektivity provedení koutového svaru. V diplomové práci byla provedena optimalizace dvou soustav za použití drátů o průměru 0,8 mm a 1 mm a bylo provedeno závěrečné porovnání včetně soustavy s drátem 1,2 mm. Optimalizace byla provedena pomocí dvou algoritmů, každý navíc ve dvou variantách. Na základě těchto výpočtů byly sestaveny grafy optimalizace, které byly navzájem porovnány. Na závěr byly získané výsledky posouzeny z hlediska praktického využití.

Klíčová slova:

MAG, koutový svar, drát, efektivita provedení, středová kompozice

Abstract:

This thesis is based on previous work with optimizing of MAG welding source-wire-gas systems using a mathematical algorithm for calculating fillet weld design efficiency. The thesis was carried out optimization of the two systems using wires with a diameter of 0.8 mm and 1 mm. Final comparison was made including system with the wire of diameter 1.2 mm. Optimization was performed using two

algorithms, each with two variants. Optimization graphs were drawn based on these calculations, which were compared with each other. In conclusion, the results were assessed in terms of practical use.

Key words:

MAG, fillet weld, wire, performance efficiency, central composition

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 5. Ledna 2011

.....

Radovan Peška

Rybničná 12

685 01 Bučovice

Poděkování

Na úvod této diplomové práce bych rád poděkoval:

Ing. Zdeňku Hudcovi, Ph.D. za užitečné a věcné rady a připomínky při zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval rodičům za podporu a trpělivost při studiu na vysoké škole.

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Teoretická část.....	11
2.1. Úvod:.....	11
2.1.1. Základ svařování pomocí metody MAG:	12
2.1.2. Schématické znázornění principu svařování metodou MAG:.....	13
2.2. Svářecí zdroj:.....	14
2.2.1. Použití rozdílného připojení k pólům zdroje umožňuje svařování dvěma způsoby:.....	15
2.3. Další součásti svářečky:	16
2.3.1. Svařovací hořáky:.....	16
2.4. Ochranné plyny:	17
2.5. Přídavné svařovací dráty pro obloukové svařování metodou MAG:	17
2.5.1. Dráty používané při svařování:.....	18
2.5.2. Nepoměděné dráty:.....	18
2.6. Svařování plným drátem a plněnou elektrodou – metoda MAG, FCAW:.....	21
2.6.1. Obloukové svařování plněnou (trubičkovou) elektrodou:.....	21
2.6.1.1. Postup výroby trubičkového drátu:.....	23
2.6.1.2. Typy trubičkových drátů:	24
2.7. Účinnost tavení materiálu:	26
2.7.1. Celková tepelná účinnost pro tavnou elektrodu:.....	27
2.7.2. Účinnost přenosu tepla obloukem η_a :	27
2.7.3. Účinnost tavení materiálu η_m při přenosu tepla vedením:	27
2.7.4. Účinnost tavení materiálu η_m při přenosu tepla prouděním:	29
2.7.5. Podíl vedení a proudění ve svarové lázni:	30
2.7.6. Proud, rychlost drátu, tavný výkon drátu:	33
2.8. Optimalizace procesu svařování:	34
2.8.1. Metoda středové kompozice	36
2.9. Metodiky:.....	38
2.9.1. Metodika 1:.....	38
2.9.2. Metodika 2 :	39
3. Experimentální část.....	41
3.1. Použitý přídavný materiál:	41
3.2. Zdroj použitý při experimentu:.....	41

3.3.	Použitý ochranný plyn:.....	42
3.4.	Příprava vzorku před vlastním svařováním:	43
3.4.1.	fáze: Návrh, provedení a vyhodnocení experimentů.....	43
3.4.1.1.	Plán experimentů:.....	43
3.4.1.2.	Svařování a metalografické vyhodnocení:	43
3.4.1.3.	Geometrická analýza a posouzení přípustnosti dle norem jakosti: ..	44
3.4.2.	fáze: Vyhodnocení ukazatelů optimalizace procesu:	46
3.4.3.	Efektivita provedení dle metodiky 2:	47
3.5.	Ukázková tabulka rozsahu parametrů a návrhu experimentů pro drát průměru 0,8mm (2série-„konzervativní“ návrh pro proměnné vd a vs):	48
3.6.	Hodnoty získané z měření a výpočtem pro drát průměru 0,8mm:.....	49
3.6.1.	Metodika 1A pro drát průměru 0,8mm:.....	49
3.6.2.	Metodika 1B pro drát průměru 0,8mm:.....	51
3.6.3.	Metodika 2A pro drát průměru 0,8mm:.....	54
3.6.4.	Metodika 2B pro drát průměru 0,8mm:.....	55
3.7.	Ukázková tabulka rozsahu parametrů a návrhu experimentů pro drát průměru 1mm (1.série-původní návrh):	56
3.8.	Hodnoty získané z měření a výpočtem pro drát průměru 1mm:.....	56
3.8.1.	Metodika 1A pro drát průměru 1mm:	57
3.8.2.	Metodika 1B pro drát průměru 1mm:	59
3.8.3.	Metodika 2A pro drát průměru 1mm:	61
3.8.4.	Metodika 2B pro drát průměru 1mm:	63
4.	Konečné zhodnocení a porovnání výsledků:	67
4.1.	Koncové porovnávací grafy pro metodiku 1A pro jednotlivé průměry drátů:	67
4.2.	Koncové porovnávací grafy pro metodiku 1B pro jednotlivé průměry drátů:	68
4.3.	Koncové porovnávací grafy pro metodiku 2A pro jednotlivé průměry drátů:	70
4.4.	Koncové porovnávací grafy pro metodiku 2B pro jednotlivé průměry drátů:	71
4.5.	Závěr:	73
5.	Seznam použité literatury:	74

Seznam a popis použitých symbolů:

I	proud	[A]
U	napětí	[V]
v_d	rychlost drátu	[m.min ⁻¹]
v_s	rychlost svařování	[m.min ⁻¹]
v_{max}	maximální účinná výška koutového svaru	[mm]
v	účinná výška koutového svaru	[mm]
z_{max}	maximální hloubka závaru	[mm]
z	hloubka závaru	[mm]
x_{max}	maximální osový závar	[mm]
x	osový závar	[mm]
a	jmenovitá velikost koutového svaru	[mm]
b, c	měřené strany koutového svaru	[mm]
w	šířka housenky	[mm]
p	převýšení svaru	[mm]
e	excentricita	[mm]
α	úhel	[°]
P_N	měřená plocha návaru	[mm ²]
P_S	průřezová plocha svaru	[mm ²]
Q	vnesené teplo	[kJ/cm]
PE	efektivita závaru svaru	[-]
DE	efektivita návaru svaru	[-]
FE	celková efektivita provedení svaru	[-]

V_t efektivní výška svaru [mm]

MIG obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu metoda se také označuje číselnou zkratkou 131

MAG obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu metoda se také označuje číselnou zkratkou 135

FCAW svařování plněnou elektrodou (trubičkovým drátem)

Další neuvedené zkratky, symboly a jejich přesný význam jsou popsány níže v práci.

1. Úvod

Tato práce řeší dílčí problém výzkumu efektivity svařování MAG, který probíhá již cca 10 let a dosud je řešen výhradně formou dizertační, diplomových a bakalářských prací. Cílem výzkumu je zmapovat oblast komerčních zdrojů, drátů a plynů formou optimalizace jednotlivých systémů zdroj-drát-plyn, které jak bylo prokázáno mají každý svoji specifickou parametrickou oblast maximální efektivity provedení svaru. Výzkum je zaměřen především na koutové svary, kde efektivita provedení se výrazně liší podle vnějšího tvaru a hloubky závaru. Součástí výzkumu je i testování vhodné metodiky vyhodnocení efektivity provedení svaru, kde v současné době testujeme 2 různé metodiky ve dvou variantách – tedy celkem 4 způsoby výpočtu efektivity.

Tato diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže, 2822 ze strany TU v Liberci, v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

2. Teoretická část

2.1. Úvod:

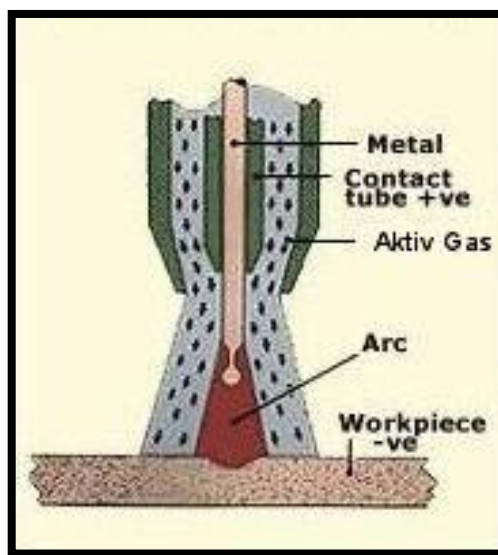
Tato práce je založena na vyhodnocení a porovnání svařování dvěma průměry drátů, porovnáním efektivity a kvality provedení koutového svaru metodou svařování MAG čili svařováním za pomoci ochranné atmosféry aktivního plynu. Pro vyhodnocení byla použita statistická metoda středové kompozice s využitím dvou základních matematických algoritmů výpočtu efektivity. Každá metodika vychází z kombinace trojice aspektů – zdroje, plynu a drátu, který byl pro nás hlavním faktorem. Při provádění praktické části byl k dispozici zdroj pro svařování firmy Migatron, označený jako SIGMA 500. Dále pro vedení drátu byl použit lineární automat a dráty pro svařování 12.50 od firmy Esab průměry 0.8, 1, 1.2 mm. Vzorky získané svařováním byly metalograficky zpracovány a vyhodnoceny pomocí programu NIS Elements, který umožňuje srovnání vzorku a změření hodnot v nastaveném měřítku. Cílem práce bylo získat grafy efektivity pro jednotlivé druhy drátů. Pro získané hodnoty a grafy bylo v poslední fázi uděláno

srovnání, abychom zjistili parametrické oblasti největší efektivity za daných vstupních podmínek.

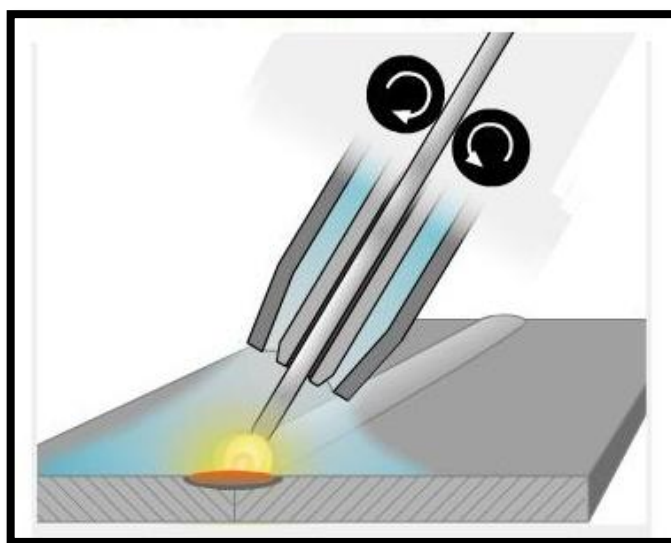
2.1.1. Základ svařování pomocí metody MAG:

Způsob svařování MAG (metal-activ-gas) je v podstatě shodný s metodou MIG. Metoda MAG se od metody MIG liší převážně druhem použitého plynu, který slouží jako ochranná atmosféra, dále pak konstrukčními úpravami svařovacího zařízení (ne vždy je třeba) a v poslední řadě drobných odchylkách regulačního systému. Při MAG svařování se používá tzv. aktivní ochranné atmosféry, která do jisté míry reaguje se svarovou lázní a kovem přenášeného odtavením elektrody do svarové lázně. Při svařování metodou MAG se nejčastěji používá k vytvoření ochranné atmosféry směsi plynů např. ($\text{Ar}+1\%\text{O}_2$), kterých se používá při svařování korozivzdorných a žáruvzdorných materiálů. Přidáním kyslíku O_2 do argonu Ar snížíme viskozitu svarové lázně a zlepšíme přechod svaru do základního materiálu sníží se tak i převýšení svarové housenky). Jako další směsi plynů se používá např. $\text{Ar}+\text{CO}_2$, $\text{Ar}+\text{CO}_2+\text{O}_2$ a celá škála dalších. V praxi se nejčastěji používá tzv. MAG – CO_2 , což je vlastně svařování MAG v ochranné atmosféře plynu CO_2 . Tato metoda se nejčastěji používá pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Pro svařování se používají zdroje stejnosměrného elektrického proudu s plochou statickou charakteristikou a obrácenou polaritou což znamená, že elektroda je připojena na + pól. **Tato metoda se hodí pro většinu materiálů a přidavné materiály jsou k dispozici pro široký sortiment kovů.** Svařování MIG/MAG je podstatně produktivnější než MMA. Při MMA vznikají také materiální ztráty při vyhazování nedopalků. Z každého kilogramu prodané obalené elektrody se asi jen 65 % stane součástí svaru (a zbytek se vyhodí). Používáním svařovacího a trubičkového drátu se účinnost zvýšila na 80 - 95 %. Svařování MIG/MAG je univerzální metoda, kterou je možno ukládat svarový kov ve větším množství a ve všech svařovacích polohách. Používá se pro svařování velmi lehkých až středně těžkých ocelových konstrukcí, pro svařování slitin hliníku a zvláště tam, kde se vyžaduje vysoký podíl ruční práce svářeče [1], [2].

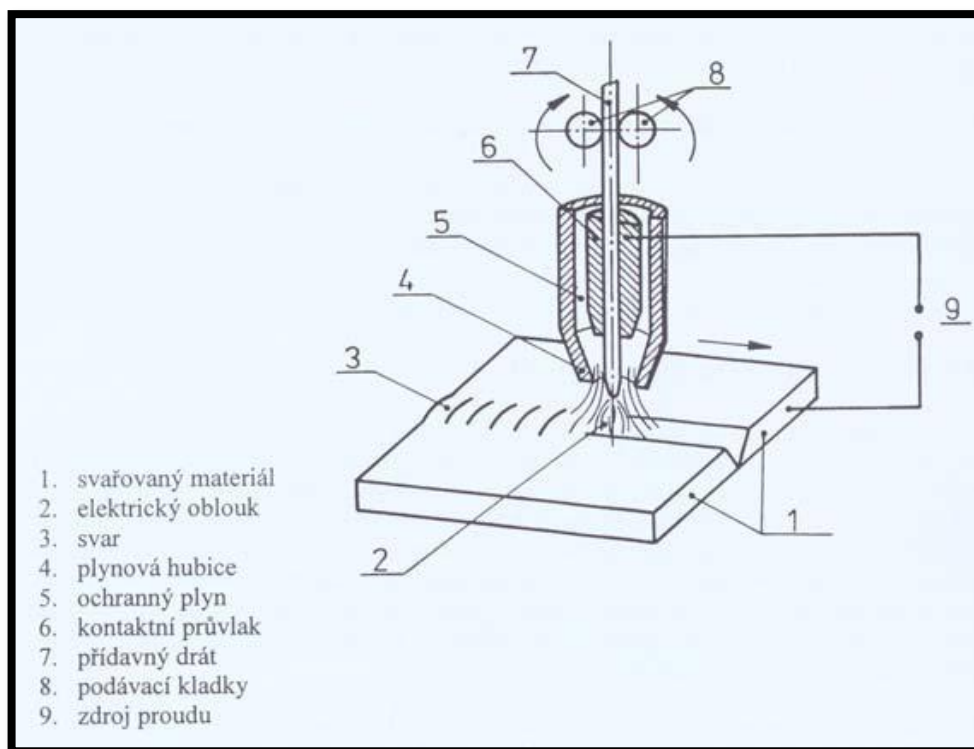
2.1.2. Schématické znázornění principu svařování metodou MAG:



Obr. 1 schéma svařování metodou MAG



Obr. 2 schéma svařování metodou MAG.[17]



Obr. 3 schéma svařování metodou MAG.[1]

2.2. Svářecí zdroj:

Účelem zdroje je dodávat do místa sváru materiál speciálním hořákem a dále udržovat elektrický oblouk mezi svařovacím drátem a svařovaným materiálem.

Na rozdíl od M.M.A. a T.I.G zdrojů, kde je pouze jeden regulovatelný parametr (svářecí proud), jsou na M.I.G. - M.A.G. zdrojích dva regulátory: jeden na regulaci intenzity oblouku svářecího proudu a druhý na regulaci rychlosti posuvu drátu. Pro svařování MMA nebo TIG je nutné mít zdroj se strmou charakteristikou. Pro svařování MIG/MAG je naopak nutná plochá charakteristika. Zdroje dělíme do dvou kategorií:

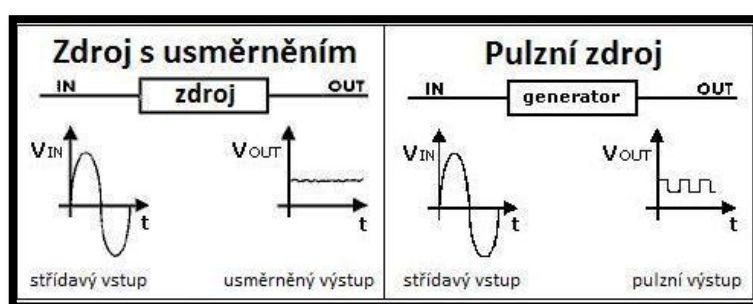
a) stejnosměrné zdroje (DC):

jsou nejobvyklejší, poskytují vysoce stabilní oblouk také díky konstantnímu přísunu svářecího materiálu. Umožňují částečnou flexibilitu volbou napětí a rychlosti posuvu drátu. Lze je využít jak pro

sváření s velmi krátkou dobou (short arc), tak i pro dlouhotrvající plynulé sváry (spray arc).

b) pulzní zdroje:

u těchto zdrojů obsluha nereguluje úroveň napětí, ale proud. Ten není konstantní, ale je upravován řadou impulsů (proto „pulzní“). Účelem pulsů je zesílit schopnost odkapávání přídavného materiálu; velmi důležitá je přesná synchronizace rychlosti posunu drátu a pulsů. Oba regulátory se používají tedy současně. Dnešní trend je sjednocovat obě funkce do jednoho ovládacího prvku.



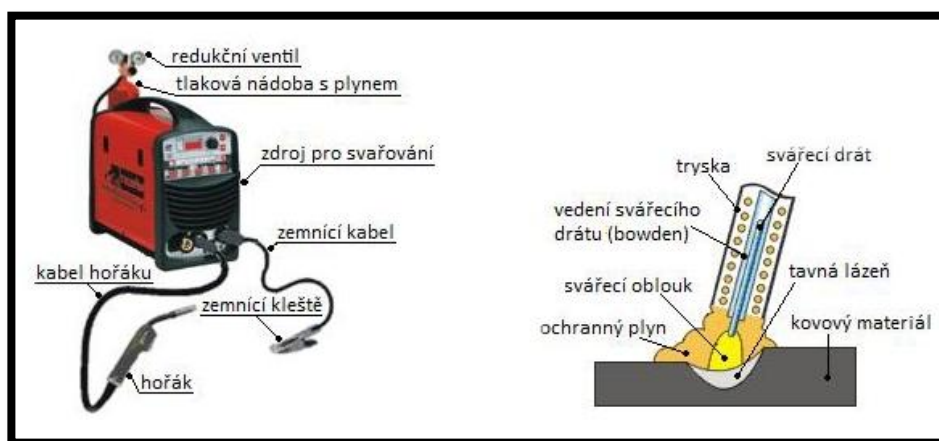
Obr. 4 rozdíl mezi stejnosměrným a pulzním zdrojem. [18]

2.2.1. Použití rozdílného připojení k pólům zdroje umožňuje svařování dvěma způsoby:

- stejnosměrné s přímou polaritou - takto označujeme připojení, kde hořák je připojen na (–) pól a zemnicí kabel na (+) pól svářečky. Tento způsob se používá při sváření trubičkovým drátem s tavidlem (FLUX)
- stejnosměrné s reverzní polaritou - takto označujeme připojení, kde je hořák připojen na (+) pól a svařovaný materiál ke kabelu na (-) pól. Jedná se o nejčastější zapojení.

2.3. Další součásti svářečky:

Hořák, podavač drátu, vodní chlazení, nádoba s regulátorem ochranného plynu, zemnicí svorka [13], [16], [18].



Obr. 5 schéma svařovacího zdroje.

2.3.1. Svařovací hořáky:

- svařovací hořáky chlazené vzduchem nebo plynem.
- svařovací hořáky chlazené vodou.

Svařovací hořáky, ať už chlazené vodou nebo vzduchem, se vyznačují vysokým výkonem, širokým pásmem typů pro všechny oblasti použití a také svou výrobně technickou kvalitou. Dalším typem vývoje je ergonomické zlepšení rukojeti a nová drátěná spirálovitá ochrana proti zlomu a tím zvýšení bezpečnosti hořáku. Naopak vodou chlazené hořáky jsou opatřeny flexibilním a přesto pevným souborem hadic.

Jedním ze speciálně upravených hořáků je hořák s nuceným kontaktním stykem označovaný jako Robacta. Tohoto hořáku se používá především pro všechny automatizované a mechanizované aplikace v průmyslové výrobě. Technickou zvláštností hořáku je nucený kontaktní styk. Svařovací drát je při něm veden do proudové trysky pod přesně definovaným úhlem, což zaručuje bezpečný a spolehlivý přestup proudu. Kontaktní přestup už nemůže být ovlivněn rozdílnou adjustací drátu, ani jeho nestejnou pružností. Svařovací proces se tím dá optimálně regulovat, přičemž je zajištěna vyšší technologická využitelnost celého zařízení. Výhodou je spolehlivé

zapalování, stabilita oblouku, menší počet rozstřiku a rovnoměrně navrstvený svar, který se dá také dobře reprodukovat.

2.4. Ochranné plyny:

Smyslem plynů je ochránit svařované místo proti vzdušné vlhkosti a nečistotám, a to vytěsněním atmosférického vzduchu plynem. Dělíme je do dvou kategorií: inertní (argon, helium a jejich směs) a aktivní (CO₂ a směsi argon/kyslík nebo argon/CO₂). Ve směsích je nejobvyklejší poměr 80 % Ar / 20 % CO₂ pro uhlíkové oceli. Pro svařování nerezů by obsah argonu ve směsi s kyslíkem nebo CO₂ neměl být nižší než 98 % [8].

2.5. Přídavné svařovací dráty pro obloukové svařování metodou MAG:

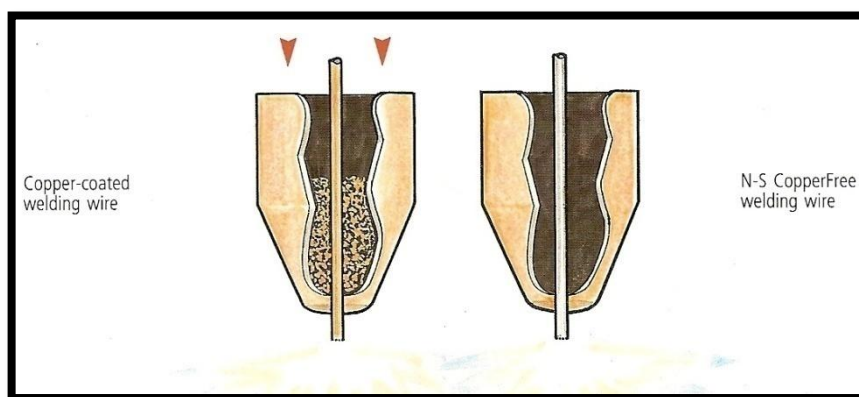
Přídavný materiál tvoří nekonečný drát, který je do hořáku plynule posouván buď ve zdroji vestavěném, nebo odděleným podavačem spolu s potřebným plynem. Elektrický oblouk hoří mezi tímto drátem a základním materiálem a vytváří tak teplo pro natavení okolního základního materiálu a vlastní tekutý kov pro vytvoření svaru. Ochranný plyn vytváří aktivní ochranu tzn. že rozkladem plynu vznikají další produkty, které spolu s výhodnými parametry svařovacího proudu, napětí na oblouku a rychlosti podávání ovlivňují i způsob odtavování kapek svarového kovu a jejich přenos obloukem. Na těchto parametrech pak rovněž závisí velikost průvaru, jakost povrchu housenky a velikost rozstřiku. Svařovací drát je za studena tažený ocelový drát, dodávaný podle ČSN EN 544 v průměrové řadě (0,6) – 0,8 – (0,9) – 1,0 – 1,2 – (1,4) a 1,6mm. Průměry uvedené v závorkách jsou méně časté. Chemické složení těchto drátů obvykle odpovídá potřebnému chemickému složení základního materiálu s tím, že při svařování v aktivním plynu je nutno počítat s určitým propalem, především křemíku a manganu. Povrch drátu pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí je buď lesklý, nebo pokovený (nejčastěji poměděný) především pro zajištění dobrého přechodu proudu při průchodu svařovacím hořákem [1], [2].

2.5.1. Dráty používané při svařování:

- poměděné svařovací dráty
- nepoměděné svařovací dráty (holé)
- trubičkové svařovací dráty

2.5.2. Nepoměděné dráty:

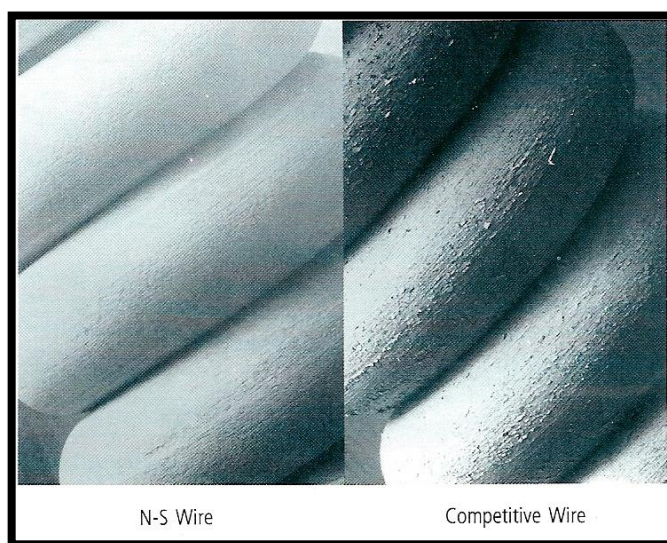
Nové svařovací dráty AristoRod od firmy ESAB určené pro svařování nerezavějících ocelí: Jedná se o novou generaci nepoměděných svařovacích drátů s klasifikací podle ČSN EN 440 jako G3Si1, G2Si a G4Si1 a s označením OK AristoRod 12.50, 12.57 a 12.63, u kterých bylo speciální úpravou povrchu dosaženo vynikajících kluzných vlastností. Nepoměděné dráty OK AristoRod od firmy ESAB mají vzhledem k absenci mědi na povrchu drátu zcela odstraněno nepříjemné riziko, kdy docházelo k ucpání bowdenu i kontaktních svařovacích špiček. Což vedlo k výraznému snížení nároků na údržbu (čištění) nutné při použití poměděných drátů a zvýšení koeficientu využití zařízení [17].



Obr. 6 rozdíl v použití poměděného a nepoměděného drátu.

Svařovací drát OK AristoRod má výborné kluzné vlastnosti, které příznivě působí, na snížení odporu vznikajícího při průchodu svařovacího drátu dlouhým bowdenem. Speciální povrchovou úpravou svařovacího drátu je docíleno optimálního přenosu proudu i zlepšení stability hoření oblouku. Navíc nedochází na povrch svaru ani při nejvyšších svařovacích parametrech k rozstříku, který by bylo nutné následnou povrchovou úpravou odstranit. Tím se dále snižují výrobní náklady na svařovací operace. Dráty pro svařování nerezavějících ocelí na rozdíl od mnoha jiných výrobců je jejich

povrch provokativně matný. Nejedná se o vadu, naopak o využití velmi moderní tažírenské technologie, která je zárukou dokonalého podávání bez prokluzu především při přerušovaném svařování a zajišťuje dokonalý přechod proudu mezi drátem a špičkou a tím i stabilní proces svařování. V této jakosti jsou dodávány typy OK Autrod 16.11, 16.12, 16.31, 16.32, 16.51, 16.53, 430LNb a 16.95 (podle ČSN EN 12072 G 19 9 Nb Si, G 19 9 L Si, G 19 12 3 Nb Si, G 19 12 3 L Si, G 23 12 L Si, G 23 12 L, G Z 17 L Nb, a G 18 8 Mn) [17].

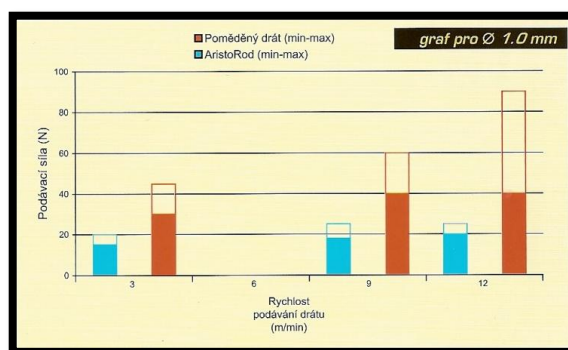


Obr. 7 holé dráty a rozdíl v povrchu vpravo drát pro svařování nerezavějících ocelí.

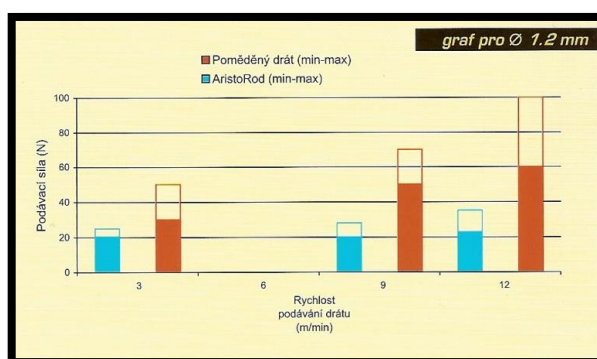
V současné době řada výrobců preferuje dodávky nepoměděného drátu z následujících důvodů:

- poměděná vrstva je poměrně křehká a při výrobě je obtížné udržet její konstantní tloušťku. Při návinu na cívky a při průchodu kladkami podavače a bowdenem má snahu se v šupinkách odlupovat a zanášet jak vlastní bowden, tak i svařovací špičky.
- potřebné čištění je zdrojem neproduktivních a ztrátových časů.
- zvyšuje se odpor při průchodu drátu bowdenem, což ovlivňuje pravidelnost přísunu drátu a tím i stabilitu hoření oblouku. Následkem je zvýšený rozstřík a horší povrch svaru.
- spolehlivá podavatelnost umožňuje zvýšení svařovacích parametrů.

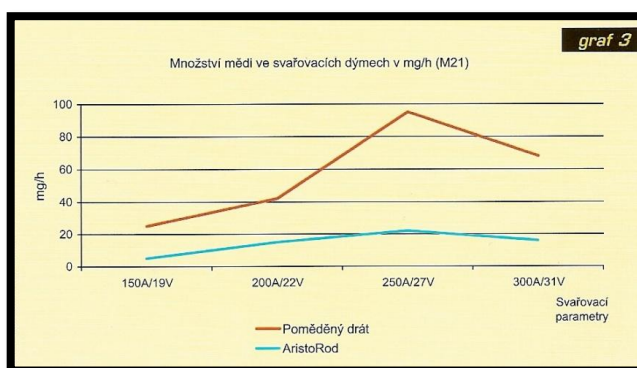
- vynikající kluzné vlastnosti drátu poskytují možnost užití delších bowdenů bez mezipodavačů.
- obsah mědi v kouřových zplodinách při svařování tvoří jejich nejtoxičtější a pro zdraví svářeče nejvíce nebezpečnou složku. Při použití nepoměděných drátů je tento obsah 4x až 5x nižší.
- speciální úprava poskytuje vyšší odolnost svařovacího drátu proti korozi.



Obr. 8 závislost podávací síla a rychlost podávání drátu 1mm [17].



Obr. 9 závislost podávací síla a rychlost podávání drátu 1,2mm [17].



Obr. 10 množství mědi obsažené ve svařovacích plynech[17].

Určitou nevýhodou nepoměděných drátů v minulosti byla vyšší spotřeba svařovacích špiček. Speciální úprava povrchu drátu, jakou používají například svařovací dráty AristoRod, je tento problém odstraněn, ale navíc drátu dodává i vynikající kluzné vlastnosti a zvýšenou odolnost proti korozi. Dochází rovněž ke zvýšení stability oblouku při velmi vysokých svařovacích parametrech, a tím i k podstatnému snížení rozstřiku a omezení následných operací při čištění okolí svaru. Tyto dráty jsou proto přednostně doporučovány pro mechanizovaná a robotizovaná pracoviště.

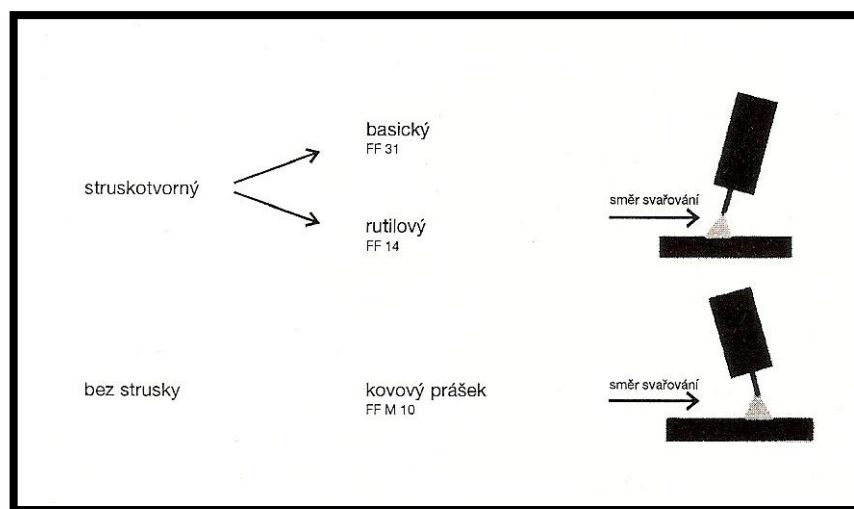
2.6. Svařování plným drátem a plněnou elektrodou – metoda MAG, FCAW:

Pokud je nutné výrazně proces svařování zrychlit, ale i zkvalitnit, je velmi vhodné vyzkoušet svařování tzv. plněnou elektrodou (trubičkovým drátem, metoda FCAW). Výhodou plněných elektrod je podstatné zvýšení postupové rychlosti u ručního svařování až o 30 %, u automatizovaného svařování i více. Tam, kde se svařuje např. plným drátem na více vrstev, budete schopni plněnou elektrodou snížit počet vrstev např. na polovinu. Plněná elektroda má také podstatně vyšší kvalitativní výsledky. Pokud se svařuje náročný výrobek s vysokým důrazem na kvalitu výsledného svaru, kde se kvalita po svaření kontroluje např. rentgenem, je téměř jisté, že plněnou elektrodou budete mít podstatně snížené náklady na případné opravy svarů, a tím také nižší náklady na opětovné rentgenové zkoušky. I když jsou kilogramové ceny plněných elektrod 2x až 4x vyšší, výsledné náklady na jeden metr provedeného svaru, v některých případech mohou být až poloviční, než je např. pro svařování metodou MAG.

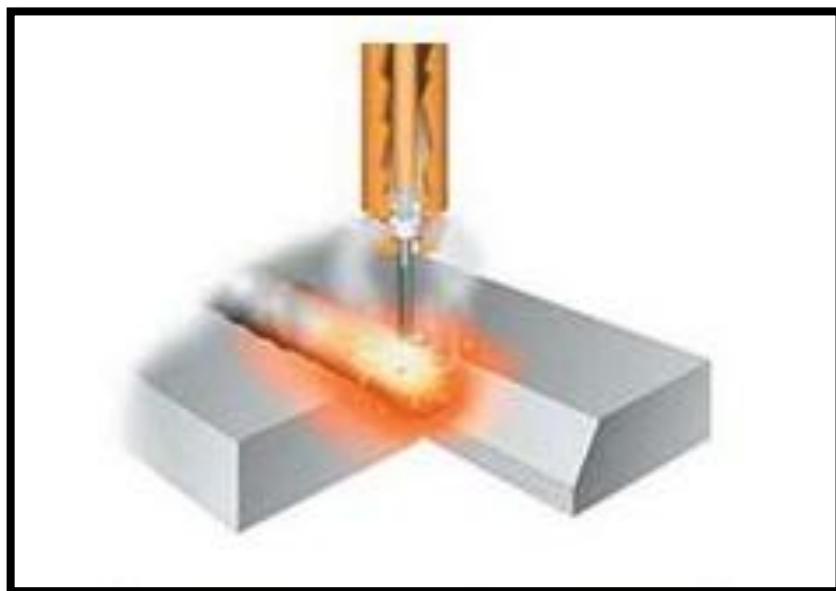
2.6.1. Obloukové svařování plněnou (trubičkovou) elektrodou:

Z pohledu práce a svařovacího zařízení, je svařování pomocí trubičkového drátu (FCAW – Flux Cored Arc Welding, dle normy se tato metoda svařování označuje jako svařování plněnou elektrodou) téměř totožné jako klasické svařování MIG/MAG. Jako u svařování MIG/MAG závisí i tato metoda na ochranném plynu, který chrání svarovou oblast roztaveného kovu. Plyn se dodává buď samostatně (trubičkový drát je určen pro svařování

v ochranné atmosféře) nebo vzniká rozkladem přísad z náplně (trubičkový drát s vlastní atmosférou). Kromě ochranného plynu produkuje trubičkový drát strusku, která slouží jako další ochrana při chladnutí svarového kovu a poté se z jeho povrchu odstraní. Při této metodě se však ke svařování nepoužívá plný drát, ale tzv. (trubička) skládající se z kovového pláště, který je uvnitř vyplněn tavidlem [19].



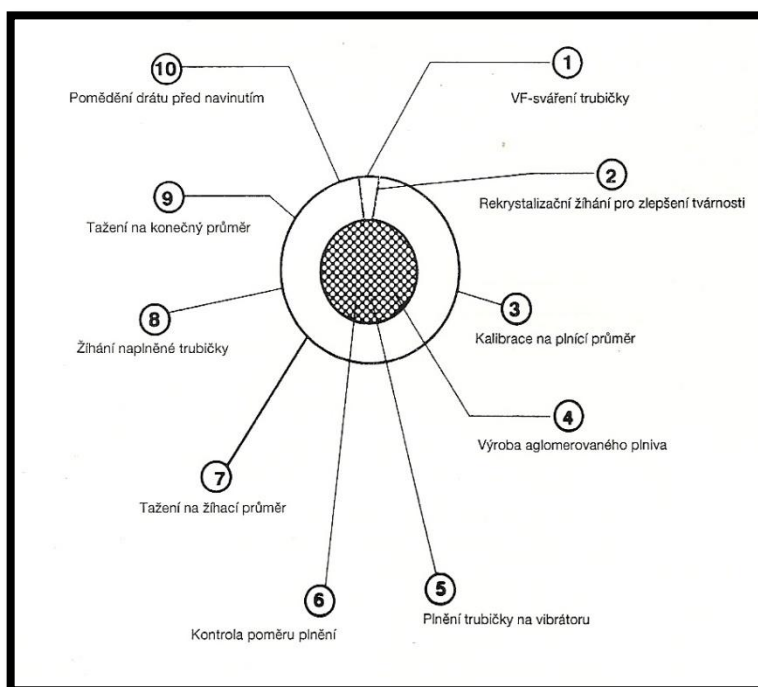
Obr. 11 rozdělení a směr svařování trubičkového drátu [19].



Obr. 12 schéma svařování trubičkovým drátem [19].

2.6.1.1. Postup výroby trubičkového drátu:

První krok při výrobě plněné elektrody (trubičkového drátu) je příslušná kovová páska, druhým krokem je tvarování pásy do tvaru písmena “U“, v dalším kroku se do takto vytvořeného (žlábků) dávkuje tavidlo a legující materiály v posledním kroku se páska za pomoci sériově uložených kladek uzavírá. Tyto tzv. falcové trubičky nelze pomědit a navíc je nutné je po nějaké době přesušovat, pokud jsou vyjmuty z obalu po dobu delší jak (72 hod.), jelikož po uplynutí stanovené doby může nastat tzv. „nabrání“ vlhkosti z okolní atmosféry pokud k tomu dojde je nutné před použitím trubičkového drátu ho přesušit podobně jako obalenou elektrodu. Druhý postup výroby trubičkového drátu je za pomoci stočení pásy, ale ta je v hlavě vysokofrekvenčně svařena, a pak následně plněna požadovanými látkami, následuje tažení na požadovaný průměr, jako poslední krok je trubičkový drát v lázni mořen a následně se poměďuje. Takto vyrobený trubičkový drát je výhodnější než trubičkový drát vyrobený první metodou, jako jeho hlavní výhoda je, že profil trubičky je zcela uzavřen a díky tomu nemůže nabírat vlhkost z okolní atmosféry [19].

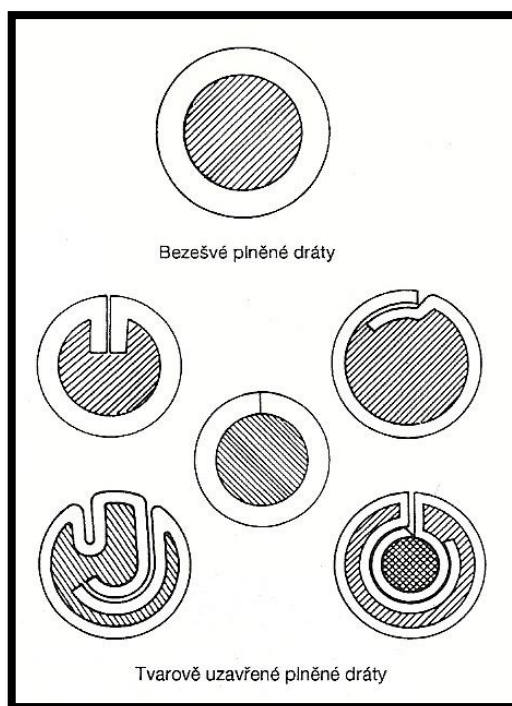


Obr. 13 průřez trubičkovým drátem [19].

2.6.1.2. Typy trubičkových drátů:

Plněné trubičkové dráty se vyrábějí v několika různých typech. **Jako první** je trubičkový drát s rutilovou náplní, kde tato náplň může být **pomaluhnuoucí**, díky čemuž dochází k tuhnutí svarové lázně ve stejnou dobu, jako tuhnutí strusky takovýto trubičkový drát se hodí pro svařovací polohy PA, PB. V praxi a více rozšířený je trubičkový drát, jehož náplň je rutilová rychle tuhnoucí, v tomto případě tuhne struska rychleji než svarový kov. Tím výrazně formuje svarovou lázeň a tak má velký význam pro svařování v polohách. Díky **rychle tuhnoucí** strusce umožňuje např. ve svislé poloze výrazně zvýšit svařovací parametry na hodnoty uložení svarového kovu, které by při použití plného drátu nešli dosáhnout, výrazně tím roste ekonomika svařovacího procesu. **Jako druhý** typ jsou trubičkové dráty s bazickou náplní. Jako hlavní výhoda této náplně je, že účinně rafinuje a čistí svarový kov, také se dosahuje výborných mechanických vlastností svarového kovu a to především v oblasti vrubových houževnatostí při velmi nízkých teplotách. Na opravu odlitků se např. používají vysoko bazické náplně, které svou struskou eliminují vliv nečistot (fosfor, síra, atd.) a tzv. licí kůry. **Jako třetí** vývojově poslední typ je kovová náplň. V dnešní době jsou trubičkové dráty tohoto typu na takové úrovni, že lze bez větších komplikací a problémů svařovat i vysoko pevnostní materiály a zároveň je dosahováno výborných mechanických hodnot. Díky operativním schopnostem těchto trubičkových drátů je možné svařovat ve všech svařovacích polohách a přitom výtěžnost je mnohem větší jak při použití plných drátů. V roce 2004 byly trubičky s kovovou náplní přesunuty do metody 135, tedy mají stejné zařazení jako plný drát a díky tomu není nutné přeškolenat svářeče na novou metodu, naopak operační vlastnosti těchto trubiček jsou pro svářeče lépe zvládnutelné než svařování za pomoci plného drátu. Ovšem trubičkové dráty s rutilovou nebo bazickou náplní zůstávají stále zařazené v metodě 136. Jelikož je zde třeba zvládnout navíc ovládání struskotvorných látek a jejich přechod přes oblouk. **Další typem** plněných trubičkových drátů jsou trubičky pro metodu MOG (Metal One Gas), občas označovanou také jako OA (Open Air). Tato metoda je zařazena pod kód 114. Svařovací zdroje jsou stejné jako pro metodu MIG/MAG, ale není třeba dodávat ochranný plyn. Hlavní

odlišnost je v náplni, která obsahuje kromě legur a struskotvorných látek, také složky které se v oblouku rozkládají a tím vytvářejí ochrannou atmosféru. Díky těmto složkám není třeba používat ochranného plynu a při použití těchto trubiček je metoda mnohem mobilnější a dá se použít a přenést kamkoliv. V praxi platí, že pro montážní, nebo externí svařování je tak garantována ochrana svarové lázně až do rychlosti větru 50km/hod. Pro dílenské využití se tyto trubičkové dráty používají málo, téměř vůbec jelikož je vysoká jejich cena a spotřeba, která je umocněna tím že náplň má mnohem větší podíl než kovový plášť. Dílensky se proto nejvíce používají v těžkých ocelových konstrukcích pro navařování a pancéřování, tedy hlavně pro renovaci a v případě že je požadována určitá tvrdost. Při použití trubičkových drátů roste efektivita svařování [19].

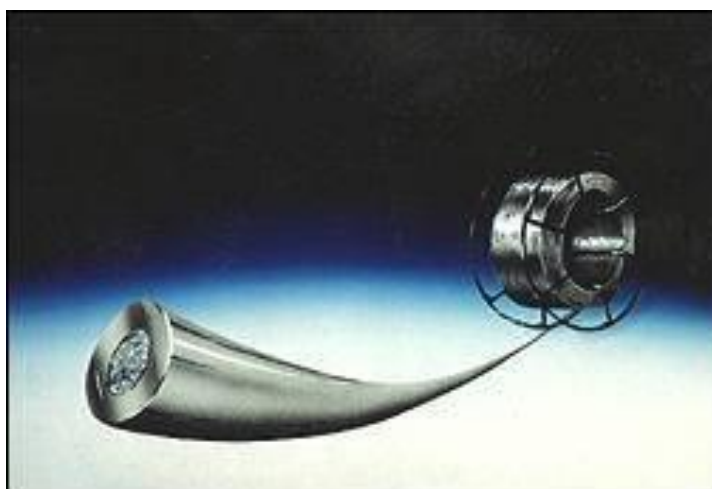


Obr. 14 průřezy trubičkových drátů (různé postupy výroby) [19].

Jmenovitě to jsou pro nelegované oceli : OK Tubrod 14.00 S (kovový prášek) zejména pro koutové svary, OK Tubrod 15.00 S (bazický), jestliže se požaduje vysoká houževnatost rázem. V kombinaci s tavidlem OK Flux 10.71 jsou oba trubičkové dráty schválené lodním registrem se stupněm 3. Pro nízkolegované oceli se uvádějí: OK Tubrod 15.24 S (bazický, legovaný 1%

Ni) a OK Tubrod 15.25 S (bazický, legovaný 2% Ni) vyvinuté v kombinaci s tavidlem OK Flux 10.62 pro použití s nejvyššími požadavky na mechanické vlastnosti, např. ve stříhací technice.

Odtavovací výkony dosažitelné s těmito dráty leží při stejné velikosti drátu o 20 až 30% výše než při stejně tlustých plných drátech, což může být využito pro vyšší svařovací rychlosti při koutových svarech nebo pro kratší doby hoření oblouku při vícevrstevovém svařování. Zařízení pro svařování pod tavidlem musí být vybaveno pro odpovídající rychlosti podávání drátu [17].



Obr. 15 trubičkový drát [17].

2.7. Účinnost tavení materiálu: [4]

Při obloukovém svařování má hlavní vliv na tavení materiálu intenzita svařovacího proudu. Vlivem intenzity svařovacího proudu a jeho rozložení na místo vznikajícího svaru dojde k intenzivnímu lokálnímu ohřevu a natavení základního materiálu tj. svařovací proud se mění na energii, která nám z části natavuje základní materiál. U svařování MAG je tento proces umocněn dopadem odtavujících se kapek přídavného materiálu v závislosti na druhu svařovacího procesu tj. druhu přenosu kovu. Výrazný vliv na svarovou lázeň má kombinace sil vznikajících vlivem mechanismu přenosu kovu. Rozhodující faktor je však rychlost svařování, která nám přímo určuje, jaké množství tepla se přímo spotřebuje pro natavení.

2.7.1. Celková tepelná účinnost pro tavnou elektrodu:

- je součtem účinnosti oblouku a účinnosti tavení.

$$\eta = 1 - ((1 - n) \cdot q_p + m \cdot q_w) / (U \cdot I)$$

kde q_p je teplo vyzářené a odvedené obloukem,
 q_w je podíl tepla absorbovaný materiálem,
 n je část energie odvedené ze sloupce oblouku a přenesené do materiálu,
 m je část energie odvedené materiálem pryč.

2.7.2. Účinnost přenosu tepla obloukem η_a :

Účinnost přeneseného tepla pomocí vzniklého el. oblouku u svařování MAG, které se vyznačuje tavící se elektrodou a směsí inertního a aktivního plynu je v rozsahu hodnot $0,84 \pm 0,04$. Zbylé procento účinnosti vzniklého tepla se ztrácí do plynného okolí a další ztráty vznikající vedením a radiací tepla.

2.7.3. Účinnost tavení materiálu η_m při přenosu tepla vedením:

Dodanou energii do svaru, lze dále rozdělit na dvě části. Převážná a tudíž zásadní část energie se využívá pro vlastní tavení svarové lázně a její podíl je efektivitou tavení η_m . Zbylá část energie, která se nevyužije k tavení, se rozptýlí do okolí svarového materiálu, vlivem tepelného vedení materiálu její účinek se projevuje na deformaci, v tepelně ovlivněné zóně a v poslední řadě v předehřevu. Účinnost tavení je určena hlavně fyzikálními vlastnostmi materiálu, které mají zásadní vliv při tvorbě tavné lázně. Vlivem tavné lázně pak dochází k přenosu tepla formou vedení a proudění. Wells prokázal, že účinnost tavení závisí na tepelné vodivosti, rychlosti svařování a šířce svaru. Pomocí matematického zápisu lze tuto formulaci zapsat jako poměr α / v_d .

- α je teplotní vodivost svařovaného materiálu (základního materiálu)
- v je rychlost svařování

- d je šířka svaru

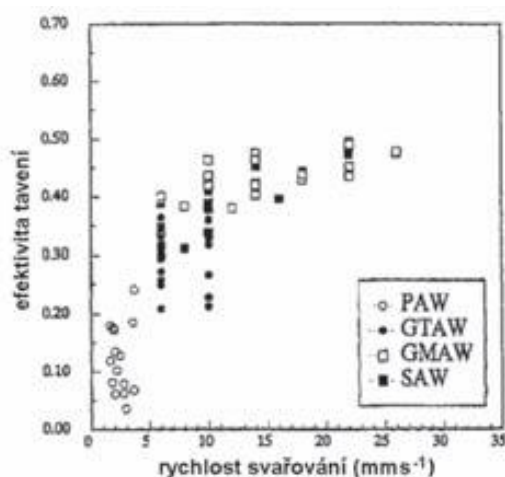
Wells navrhl výpočtové rovnice pro výpočet efektivity tavení a to ve 2D a 3D (tepelný tok). Navržené vztahy nám ukazují, na počáteční vysoké nárůsty účinnosti tavení v závislosti na rychlosti svařování a nasycení η_m . Ta má hodnotu pro 2D rovnu 0,48 a pro 3D 0,37 což jsou podmínky tepelného toku při vysokých svařovacích rychlostech. Je to vlastně poměr teplotní vodivosti základního materiálu a rychlosti svařování, tento poměr vychází číselně nízký.

$$\eta_m = \frac{1}{\frac{8 \cdot \alpha}{5 \cdot v \cdot d} + 2} \quad \text{pro 2D} \quad (1)$$

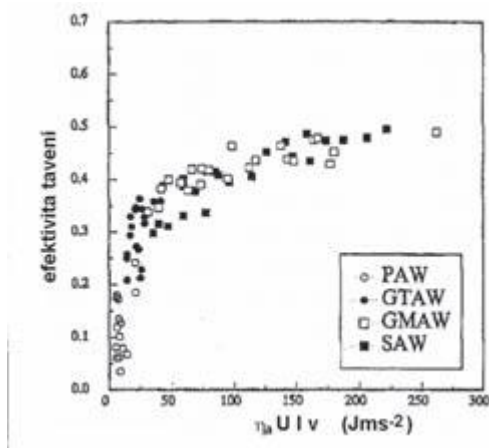
$$\eta_m = \frac{1}{1,35 \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{10,4 \cdot \alpha^2}{(v \cdot d)^2}} \right)} \quad \text{pro 3D odvod tepla} \quad (2)$$

Účinnost tavení určena poměrem tepla použitého k tavení a celkového vneseného tepla do svarku nám ukazuje, na vztah mezi okamžitým výkonem ($\eta_a \cdot U \cdot I$) dodaným na místo svarku zdrojem, který se pohybuje rychlostí v a teplem odvedeným od svaru vlivem teplotního vedení α . Při zvyšování lokálního výkonu ohřevu se může i zdroj svařovacího tepla pohybovat rychleji a tím dojde ke zkrácení času přenosu energie vedením tepla ven od svaru. Nárůst účinnosti je dán vnesením většího množství energie do procesu tavení.

Matematické řešení rozdělení tepla ve 2D a 3D pouze vlivem vedení tepla a spojením se simulačními programy nám ukazují teplotní profily ve svaru, které určují ideální tvar svarové lázně, ale také šířku a strukturu tepelně ovlivněné oblasti a v neposlední řadě deformační a napěťové poměry v okolí svaru. Neřeší však další vzniklé faktory jako tvar svarové lázně nebo skutečnou hloubku závaru.



Obr. 16 Efektivita tavení jako funkce rychlosti svařování.

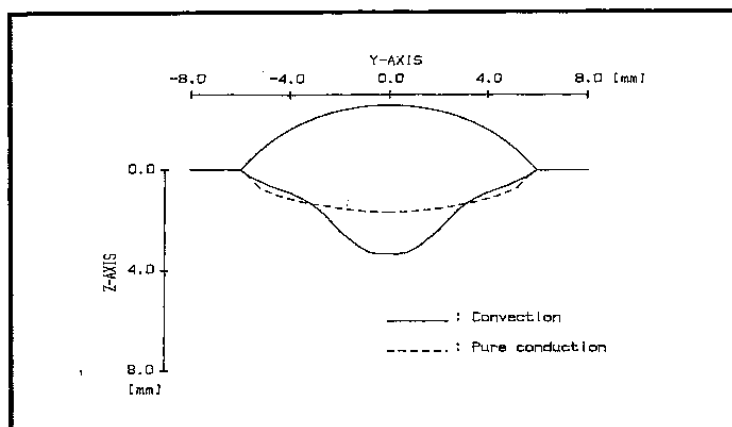


Obr.17 Závislost efektivity tavení na násobku výkonu a rychlosti svařování.

2.7.4. Účinnost tavení materiálu η_m při přenosu tepla prouděním:

Účinnost tavení nám výrazně narůstá vlivem proudění ve svarové lázni tj. větší účinnost při přenosu tepla. Proudění ve svarové lázni má zásadní vliv na určení výsledné geometrie svaru. Na následujícím obrázku (Obr.18) je znázorněn tvar svarové lázně nejdříve pouze za působení vedení znázorněné (čárkovanou čarou) a následně vliv proudění znázorněné (plnou čarou). Na plné čáře lze pozorovat vliv proudění při přenosu tepla a také

působení dostředného působení svarové lázně, toto teplo vlivem proudění zvětšuje přenos tepla ke kořeni svaru a to mnohem lépe než vedením.



Obr. 18 Simulace vlivu vedení a proudění tepla na tvar svarové lázně.

2.7.5. Podíl vedení a proudění ve svarové lázni:

Experimentálním výzkumem Limmaneevichitra a Koua kteří se při experimentu zabývali vlivem vlastností materiálu a vlivu zdroje na tzv. Marangoniho proudění tj. vliv povrchového napětí působícího radiálně ve směru gradientu teploty (termokapilární proudění). Výzkum byl zaměřen na převládající směr a sílu proudění k určení těchto hodnot použili proměnlivě zaostřený laserový paprsek, který působil na dvě rozdílné látky s velmi odlišným Prandtlovým a Pecketovým číslem. Vztahy pro tato čísla jsou uvedeny níže a následně jsou vysvětleny použité hodnoty [4].

$$Pr = \frac{c_p * \mu}{k} \quad (3)$$

$$Pe = \frac{L * V}{\alpha} \quad (4)$$

Pr.....Prandtlovo číslo

Pe.....Pecketovo číslo

k.....tepelná vodivost

L.....poměr povrchu svarové lázně

C_p.....specifikované teplo proudění

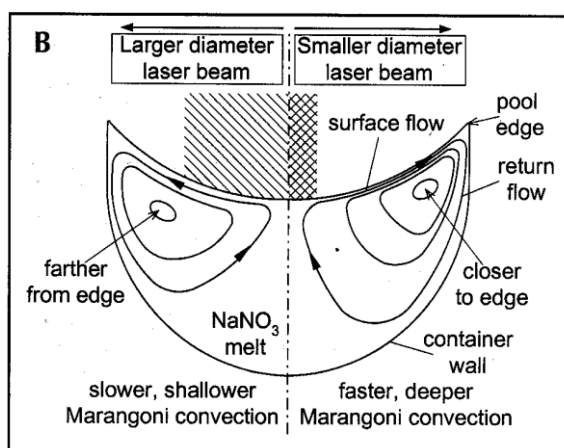
V.....maximální povrchová rychlost

μ.....dynamická viskozita

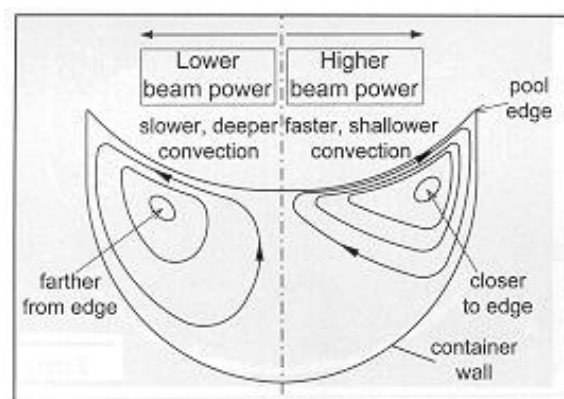
α.....tepelná vodivost

Z experimentu bylo zjištěno, že nejlépe určující poměr tepelného přenosu vedení a proudění vystihuje Pecletovo číslo, které je tím nejlepším

ukazatelem na tvar svarové lázně. S rostoucím Peclet. číslem roste i vliv Marangoniho proudění. Svarová lázeň má různé teploty v jejím středu a na jejím okraji tento rozdíl teplot je rozdílem intenzity povrchového napětí. Tavenina proudí v tomto směru na povrchu lázně, až do doby kdy dosáhne okraje svarové lázně, na tomto okraji dojde ke stočení proudu taveniny směrem dolů do materiálu. Vlivem tohoto proudění se vytváří široký závar, který má ploché dno. V případě že je hodnota Pe čísla několikanásobně větší než 1, je řídicí proces (přenosu tepla v lázni) proudění a vedení zanedbatelný. Na druhé straně pokud je hodnota Pe menší než 1 (kovy s vysokou tepelnou vodivostí) a při působení nízkých rychlostí na malé svary je převládajícím vlivem vedení [4].



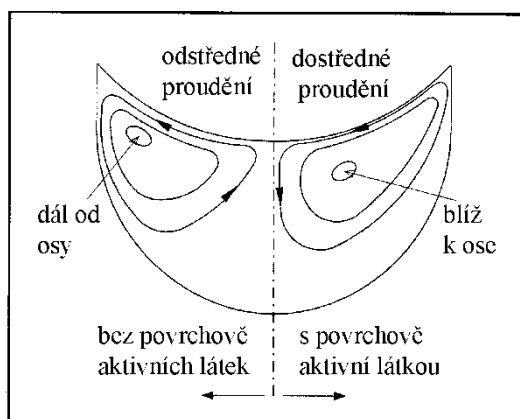
Obr.19 Vliv koncentrace zdroje na umístění středu a rychlost Marangoniho proudění.



Obr.20 Vliv množství tepla na umístění středu a rychlost Marangoniho proudění.

Rychlost Marangoniho proudění roste v závislosti na zužujícím se paprsku (užší paprsek = vyšší intenzita). Rychlost zpětného proudění je nižší než rychlost taveniny na povrchu vznikajícího svaru tj. střed víru je více umístěn k povrchu a okraji svaru jak vyplývá z předchozích obrázků (Obr.19, Obr.20). Užším svařovacím paprskem se hloubka, kde tavenina proudí, zvětšuje vlivem vyššího momentu zpětného proudění, naopak vyšším výkonem snižuje.

Dále se autoři zabývali výzkumem vlivu povrchově aktivních látek. Při použití látky s příměsí povrchově aktivní látky dojde k obrácení směru Marangoniho proudění, které začne proudit ke středu. Jelikož povrchově aktivní látky způsobují obrácení gradientu povrchového napětí. Vliv povrchově aktivních látek a změna Maranginiho proudění je znázorněna na následujícím obrázku (Obr.21).



Obr. 21 Vliv povrchově aktivní látky na směr proudění v tavné lázni.

Mezi tyto hlavní povrchově aktivní látky působící při procesu svařování se řadí kyslík a síra. S rostoucí teplotou čistého kovu povrchové napětí klesá naopak, při působení zmíněných prvků v závislosti na teplotě roste. Což je vlastně způsobeno obráceným prouděním tavné lázně. Při záporném teplotním gradientu povrchového napětí ($\frac{d\gamma}{dT}$) plyne, že Marangoniho proudění proudí směrem do středu tavné lázně. Povrchově aktivní látky mají vliv na geometrii lázně pouze tehdy, pokud z větší části působí jako přenos tepla proudění tj. ($Pe \gg 1$).

Při experimentálním výzkumu, se hodnota η_m vypočítá z velikosti plochy svaru a vneseného tepla do svarové lázně, tato vypočtená hodnota v sobě zahrnuje jak vedení tepla tak i proudění. V matematickém zápisu vypadá rovnice takto:

$$\eta_m = \frac{Q \cdot P_s \cdot v_s}{\eta_a \cdot U \cdot I} \quad (5)$$

Q.....entalpie (pro ocel $Q=10,5\text{J/mm}^3$)

Ps.....plocha svaru (mm^2)

vs.....rychlost svařování

U.....napětí

I.....proud

η_aúčinnost přenosu tepla obloukem

Hodnoty U, I, vs, η_a , jsou převrácenou hodnotou měrného vneseného tepla.

2.7.6. Proud, rychlost drátu, tavný výkon drátu:

Základní proměnnou veličinou při svařování metodou MAG je el. proud označuje se I a jeho jednotkou je Ampér [A]. Při MAG svařování na el. proudu nebo též svařovacím proudem závisí tavný výkon, hloubka závaru, ale také způsob přenosu kovu z elektrody do svarové lázně, při současném působení ochranného plynu. Svařovací proud při MAG svařování nelze předem přesně nastavit, jelikož svařovací proud respektive jeho hodnota vzniká, až po zapálení oblouku mezi elektrodou a svařovaným materiálem pak lze nastavit proud upravením rychlosti podávání drátu.

Tavný výkon (P) závisí na anodovém poklesu napětí U_a a odporu konce drátu R (Ω), kterým je proud veden od kontaktní špičky po anodovou skvrnu – výlet drátu L (mm). Tavný výkon generovaný celkovým poklesem potenciálu je určen vztahem, kde ρ je měrný odpor drátu a D jeho průměr [4].

$$P = I \cdot (U_a + I \cdot R) = I \cdot U_a + I^2 \cdot \rho \cdot L / D^2 \quad (6)$$

Z tohoto vztahu lze vyvodit, že při daném výkonu zdroje a současně délce výletu drátu (délka volného konce drátu) se zvyšuje hodnota tavení drátu v závislosti na snížení tavení materiálu vlivem el. oblouku. Z toho je patrné, že při zvětšující se ploše svaru, klesá velikost závaru a tím i efektivita prováděného svaru (male provaření do hloubky velká šířka svaru).

2.8. Optimalizace procesu svařování: [4]

Při svařování MAG, působí řada vnějších faktorů a procesních proměnných, které doprovázejí každý technologický proces. Správná kombinace v omezeném rozsahu těchto proměnných veličin nám zaručuje optimální výsledek. S narůstajícím počtem proměnných veličin a podmínek se nám geometricky zvětšuje i prostor, který nám vymezuje optimální oblast nastavení. Je to dáno tím, že se zvětšujícím počtem kombinací a tím i experimentů oblast roste s každou další proměnnou vstupující do procesu. Nejpoužívanější metody statického návrhu experimentu pro optimalizaci automatického obloukového svařování, které nám umožňují dosáhnout použitelných výsledků při minimálním počtu experimentů. Jednou z metod řešení optimalizace efektivity provedení koutového svaru je statická metoda středové kompozice, která se vyhodnocuje pomocí souboru provedených experimentů.

Vymezení rámce podmínek a parametrů

První fází je uspořádání okrajových podmínek, vstupních a výstupních faktorů, které jsou součástí svařování MAG podle daného účelu optimalizace:

Vstupní podmínky, ze kterých vycházíme při řešení a nebudeme je v průběhu měnit. Např. poloha svařování, svařovaný materiál, způsob svařování.

Výchozí podmínky, z nichž v další fázi procesu, vybereme další procesní proměnné, které potom v dané fázi úkolů neměníme pro omezení počtu experimentu. Např. svařovací zdroj, podavač, délka bowbenu, hořák, druh

drátu, průměr, povrchová úprava, složení ochranného plynu, tloušťka materiálu.

Procesní proměnné (vstupní) se dále pak dělí na nastavitelné: Např. rychlost drátu, napětí na prázdno, rychlost svařování, délka oblouku, úhel náklonu hořáku, vzdálenost kontaktní špičky nad povrchem svařovaného materiálu, někdy také průtočné množství plynu, sklon statické charakteristiky zdroje a jen měřitelné-proud, pracovní napětí.

Šumové faktory mohou to být některé, už z uvedených podmínek, jejichž vliv není znám, ale při experimentech musíme umět určit, jejich možný rozsah a posoudit možný dopad na výstupní hodnoty – např. rozměrová a tvarová přesnost sestavení, seřízení dráhy hořáku (vyosení), mezera.

Výstupní měřitelné hodnoty (odezva) – jsou to většinou geometrické rozměry svaru: šířka svaru w , hloubka závaru z , převýšení r , tloušťka svaru (nosná velikost) v , plocha průřezu návaru P a celého svaru P_s , atd.

Vstupní a výstupní výpočtové hodnoty, vyjadřující kombinaci působení hlavních parametrů a většinou jsou optimalizovanými hodnotami:

vstupní: **výpočtová plocha návaru**

$$P = \pi \cdot r^2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{v_D}{v_s} \quad [mm^2] \quad (7)$$

průřezová plocha drátu x koeficient propalu drátu (dle výrobce -0,97), x koeficient rozstřiku x poměr rychlosti drátu k rychlosti svařování.

jednotkové vnesené teplo

$$Q_1 = k \cdot \eta \cdot \frac{U \cdot I}{v_s} \quad [kJ/cm] \quad (8)$$

tedy násobek proudu a napětí dělený rychlostí svařování x účinnost oblouku (MAG $\eta=0,84$) x převodní koeficient k (0,06 pro v_s [cm/min.])

výstupní: **% zředění D** $= (P_s - P)/P_s$ [%] (9)

a konečně efektivita provedení E, definovaná minule [6].

Restrikční kvalitativní ukazatel většinou se mohou týkat struktury i geometrie a vycházejí z příslušných norem. Např. převýšení, pravidelnost housenky, poměr šířky svaru k výšce, zápaly po stranách.

Hlavní a nejdůležitějšími parametry jsou (měřitelné) proud I [A] a napětí U [V] (nastavitelné-rychlost drátu a délka oblouku). Jejich kombinace má významný podíl na vytváření oblasti stability hoření oblouku a tím má i zásadní vliv na přítomnost a druh přenosu kovu při svařování MAG. Další vstupující základní veličinou je rychlost svařování v_s [cm/min], která má hlavní vliv na jednotkové množství vneseného tepla do svaru a tím má vliv i na geometrii housenky. Další parametry doprovázející svařovací proces jsou již méně důležité, proto se dá jejich optimalizace provádět na začátku nebo až v další fázi experimentálního procesu. V některých experimentech se jako další veličina ještě vyskytuje vzdálenost kontaktní špičky nad povrchem L [mm], která souvisí s koncentrací svařovacího oblouku její délka je omezena délkou oblouku a stabilitou procesu (hořáku, drátu, podavače, kvalitou zdroje).

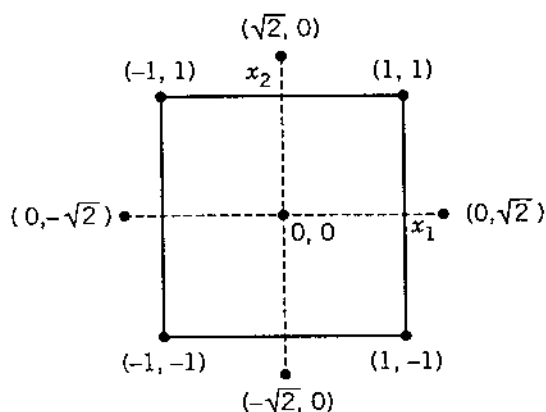
2.8.1. Metoda středové kompozice [7]

proti uvedenému ortogonálnímu uspořádání, nabízí vhodnější **sférické uspořádání** parametrického prostoru.

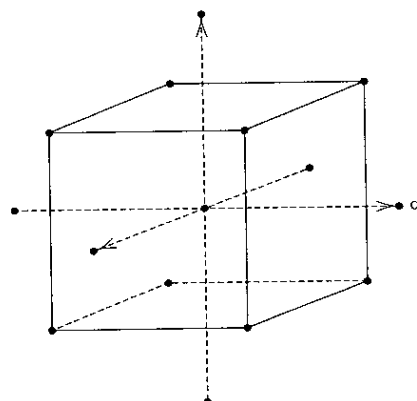
Návrhová matice experimentů podle středové kompozice sestává z:

1. Úplného 2^k faktoriálu na úrovni $-1, 1$ (k = počet řídících proměnných)
2. Osových bodů (mezní, 0) – celkem $2 \cdot k$ rovnic
3. Středových bodů (0,0) – doporučeno 3 až 7 rovnic

Body návrhu tak vymezí v parametrickém prostoru vícerozměrný sférický tvar (kruh pro 2 parametry, koule pro 3 parametry, atd. viz obr. 22 a 23), doplněné o několik středových bodů, poskytujících odhad rozptylu.



Obr. 22



Obr. 23

Používá regresní **rovnici druhého řádu** jejíž základní tvar je:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (10)$$

Regresní rovnice druhého řádu umožňuje modelovat zakřivení funkce, proto musí být řídicí proměnné sledovány nejméně ve třech, ale nejlépe na pěti úrovních a tak z hlediska přiměřeného počtu potřebných experimentů by měl být počet řídicích parametrů co nejmenší.

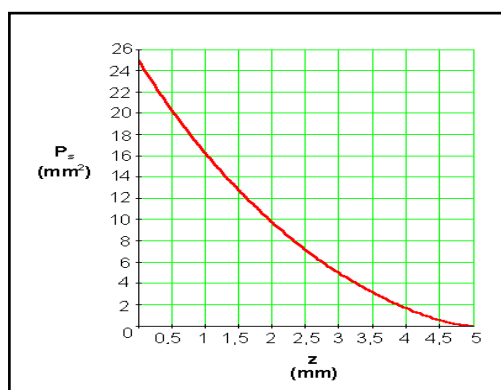
Důležitým předpokladem použití je dovednost přibližného odhadnutí jednotlivých faktorů a jejich vazba na výstupní veličiny. To je možné je n za předpokladu určité znalosti daného procesu. Jako první krok je třeba nejdříve provést tzv. screening, což znamená odhadové vytipování **oblasti blízko-optimálních podmínek**. Pro takto vytipované hodnoty sestavíme tzv. soubor řídicích parametrů. Na takto vytvořený soubor dat je přímo navázán i rozsah návrhu experimentů podle použité středové kompozice. Metoda statistického návrhu souborů experimentů pomocí metody středové kompozice je založena na **dvou až třech hlavních parametrech** a to na rychlosti drátu, rychlosti svařování, (napětí). **V pěti hlavních hladinách** $(-\sqrt{2}, -1, 0, 1, \sqrt{2})$, které lze také přesně určit z již uvedeného obr.. Použitelnost a aplikace modelů byla statisticky testována a vyhověla pro 95 % hladin významnosti. To je především dáno spojitostí a vysokou stabilitou procesu STP. Konečným výstupem ze souboru dat jsou grafické závislosti výstupních rozměrů housenky na jednotlivých průvodních parametrech jednoho

výstupního na dvou vstupních, případně i názorné, ale prakticky méně použitelné prostorové 3D grafy. Tato aplikace bude dále prezentována přímo na řešení optimalizace svařovacího procesu u technologie MAG v praktické části.

2.9. Metodiky:

2.9.1. Metodika 1[4]:

Tato metodika je založena na tzv. řízené hloubce závaru, která je vyvozena z geometrie koutového svaru. Jako měřitelná hodnota je zde použita tzv. skutečná maximální hloubka závaru „z“, která je i součástí skutečné účinné výšky základního materiálu. Tato maximální hloubka závaru je klíčová pro výpočet tzv. efektivní účinné výšky svaru „ v_t “ pro danou plochu návaru P. Získaná hloubka závaru „z“ nám, ale určuje u plochy jen jednu velikost max. účinné výšky „ v_t “. Graf na obr.24 nám ukazuje jak křivka závislosti $P=f(v_t, z)$ začíná plně výplňovým svarem s nulovým nebo min. závarem postupně roste a končí na plném závarovém svaru bez použití přídavného materiálu.



Obr. 24 Diagram $P = f(z)$ závaru pro konst. účinnou výšku v_t .

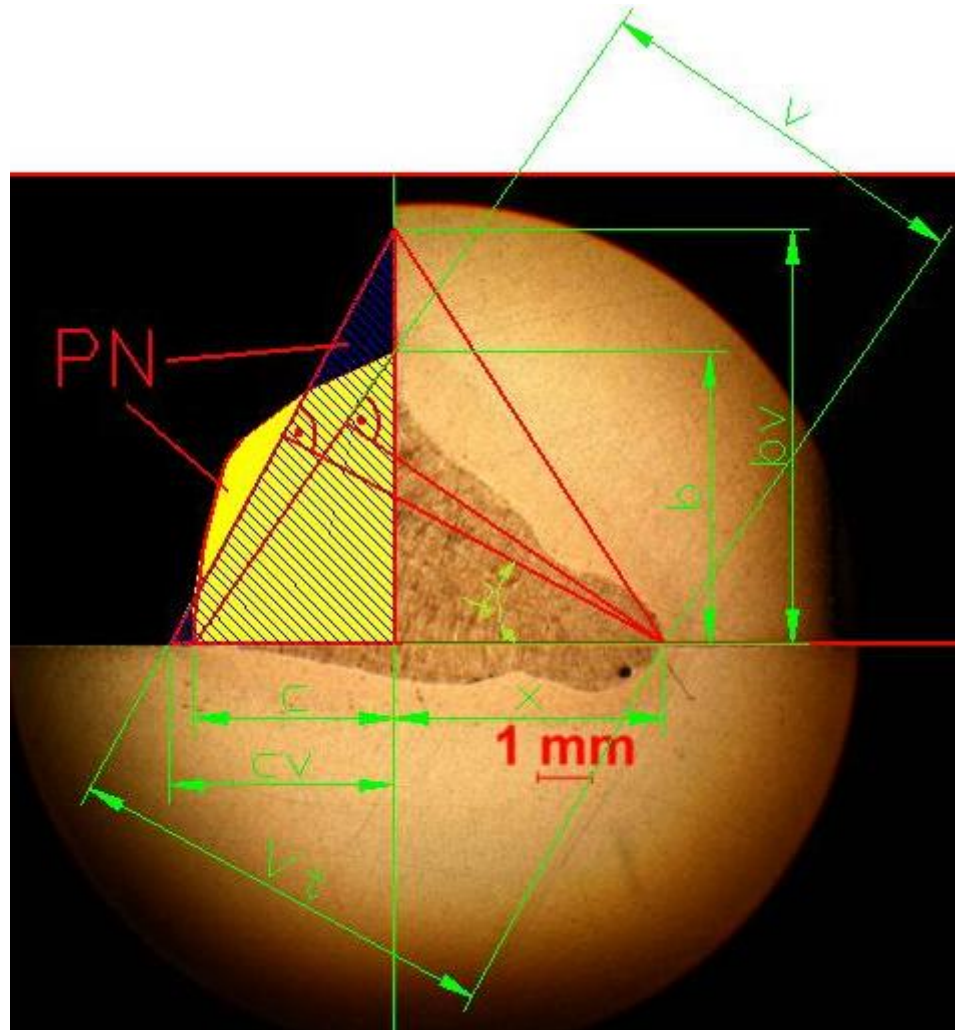
Při porovnávání svarů musíme brát tedy ohled na ideálně směřovaný závar i geometrii návaru. Při výpočtu je použita maximální hodnota závaru a to i v případě pokud není svar směřován do stykové plochy, ale naopak do pásnice. Svary, které nám směřují do stojny jsou při vyhodnocení vyřazeny jelikož stojna má nižší koef. odvodu tepla. Návarová geometrie se nám také

promítá v koeficientu efektivity návaru. Efektivita provedení u koutového svaru byla rozdělena na dvě hlavní určující veličiny a to efektivitu závaru $PE=z/v_t$ a efektivitu návaru, kterou lze také rozdělit do dvou variant dle jakosti zhotovení. První variantou a) je tedy oddělení vlivu návaru od působení závaru $DE=(v-z)/(v_t-z)$. Jako druhá varianta b) je použita jen korekce vlivu závaru $DE=v/v_t$. Pro výpočet výsledné hodnoty efektivity koutového svaru nám slouží konečný vzorec $FE=PE.DE$. Takto získaná hodnota FE je charakteristickou pro každou optimalizovanou soustavu zdroj, drát, plyn, kde určuje parametrické pole, velikost svaru a efektivní plochu průřezu. Při provádění experimentu bylo zjištěno, že při použití vyhodnocovací metody a) má hlavní vliv převýšení a stečení svaru na konečnou efektivitu. Jako stupeň jakosti 1 jsou označeny svary, které mají malé převýšení a přechodové úhly přes 110° . Při použití metody b) jsou kritéria méně přísná a dovolují nám použít efektivní svary, které jsou převýšené až do přechodového úhlu 90° především u pásnice. Takto zhotovené svary, se vyznačují hlubším závarem, při pohledu jsou užší a mají i vyšší hodnotu efektivity. Tyto svary spadají do jakostního stupně 3.

2.9.2. Metodika 2 [5]:

Druhá metodika je založena na technologickém modelu, kde je zohledněno, že hloubka závaru i plocha návaru jsou závislé na velikosti proudu. To znamená, že pokud použijeme nižší rychlost drátu a proudu pro žádanou plochu návaru nebude dosaženo stejné hloubky závaru. Při přepočtu je požadována tedy konstantní plocha. V praxi to znamená, že ideální nosná výška je odvozena ze skutečné plochy ideálního tvaru a je vždy větší než skutečná výška. Do tohoto modelu je také zahrnuta nepřesnost vznikající vyosením hořáku. Pro získání PE je zde tedy použit poměr skutečného osového závaru „x“ a ideální výšky „ v_t “. Přesný vzorec pro výpočet PE je tedy: $PE=x/v_t$. Výpočet DE, zůstává stejný jako v předchozím případě tj. v/v_t (poměr skutečné výšky svaru k ideální výšce). V tomto vztahu jsou zahrnuty i ztráty vzniklé nerovností trojúhelníka a převýšením svaru. Tento algoritmus se od předchozího liší především v náročnějším výpočtu, který vede k řešení kvartické rovnice. Toto řešení tedy vychází z reálných technologických a konstrukčních podmínek. Díky tomu je získáno reálné zobrazení ideálního

koutového svaru, který svou plochou a závarem odpovídá skutečnému, provedenému svaru, jehož rozměry lze spočítat a nakreslit. Nevýhodou této metodiky jsou vyšší nároky na přesnost provedení experimentu především pak na vyosení svařovacího hořáku. U svarů, kde max. závar jde spíše do pásnice, jak do mezery vznikají pak zkreslené výsledky.



Obr. 25 Znázornění metodiky 2 na svaru [5].

3. Experimentální část

Cílem diplomové práce bylo zjištění optimálních podmínek, tedy efektivity provedení koutového svaru v soustavě tří základních členů (drát, zdroj, plyn). V této práci byl kladen největší důraz na použitý drát především na jeho průměr. Pro vyhodnocení a optimalizaci výsledků experimentů bylo použito jedné z metod statistického plánování experimentů (DOE), metody centrální kompozice, kde jako výstupní (odezvová) hodnota byla použita výpočtová hodnota efektivity provedení koutového svaru, která se vypočítala podle dvou základních metodik, z nichž každá byla navíc rozdělena na další dvě podle rozhodovacího hlediska jakosti provedení svaru. Výsledkem aplikovaných metodik na provedené a vyhodnocené metalografické vzorky koutových svarů bylo určení kombinace základních parametrů svařování pro dosažení maximální efektivity provedení koutového svaru a přehledného grafického znázornění vlivu základních parametrů na efektivitu provedení. Takto získané numerické a grafické hodnoty pro soustavy zdroj-plyn- 3 druhy drátu byly nakonec vzájemně porovnány pro přesné určení nejlepších kombinací nastavených podmínek provedení určité velikosti koutového svaru v závislosti na jeho efektivitě a jakosti.

3.1. Použitý přídavný materiál:

Jako přídavný materiál byl použit svařovací plný holý drát firmy Esab - drát OK AristoRod 12.50. Při provádění experimentu byly testovány tři různé průměry tohoto drátu (0.8, 1 a 1.2 mm [8]). Použitý drát spadá do skupiny nepoměděných plných drátů nové generace. Výhodou použitého drátu bylo především využití vyšší rychlosti podávání drátu a také odpadlo časté čištění svařovací špičky, která se často zanášela při použití poměděných drátů. Navíc zmíněný drát má lepší vlastnosti při použití v mechanizovaném a robotizovaném svařování.

3.2. Zdroj použitý při experimentu:

Jako svařovací zdroj pro experimentální část byl použit zapůjčený zdroj od firmy Migatron Sigma 500 pulse. Tento zdroj je určen dle údajů firmy především pro technologii MAG/MIG, ale také pro MIG impulse a MMA

technologii. Základem zdroje je tzv. invertorová technologie, která má značné výhody oproti zdrojům založených na skokovém řízení. Tato technologie u zdroje nám zaručuje rychlou odezvu a pružnost parametrů. Mezi další výhody tohoto zdroje patří rozšířený Puls panel, díky němuž můžeme snadno nastavovat primární i sekundární parametry doprovázející proces svařování. Jako další výhoda zdroje je rozšíření akčního rádiusu, toho bylo u zdroje dosaženo zavedením snímatelného podávacího systému. Mezi výhody tohoto zdroje však patří i možnost softwarové úpravy pomocí různých programů do, kterých lze zahrnout např. průměr svařovacího drátu, druh svařovaného materiálu, použitý plyn nebo možnost svařování za pomoci impulsního přenosu. Použitý zdroj s dodatkem pulse, nám navíc umožňoval i svařování za pomoci tzv. funkce Duo Pulse nebo možnost stahování materiálu a nastavení až 9 sekvencí [20].



Obr. 26 Svářecí zdroj Sigma 500 pulse od firmy Migatron

Technická data

ZDROJ PROUDU	Sigma 500 STB
Napájecí napětí	3 x 400V +/- 15 %
Pojistky	32 A
Příkon naprázdno	40 VA
Proud činný	25,8 A
Příkon max.	31 kVA
Napětí naprázdno	83 V
Proudový rozsah	15-500 A
Zatěžovatel 20°C 100%	475 A
Zatěžovatel 20°C 70%	500 A (80%)
Zatěžovatel 40°C 100%	420 A
Zatěžovatel 40°C 60%	450 A
Zatěžovatel 40°C 40%	500 A (55%)
Rychlost podávání	
Průměr drátu	
Max. průměr cívky	
Chladicí výkon	1,2 kW 1)
Objem nádiže	3,5 l
Max. tlak chlazení	3,0 bar
Průtok při 1,2 bar/60°C	1,75 l / min
Třída aplikace	
Třída ochrany	IP 23
Norma	EN60974-1 EN60974-2 EN60974-5 EN60974-10
Rozměry d x š x v, cm 2)	119 x 54,5 x 120
Hmotnost	86 kg 3) 4)

3.3. Použitý ochranný plyn:

Jako ochranná atmosféra při svařování byla použita třísložková směs plynu označeného jako Ferromaxx Plus. Tato směs plynu je smíšená v následujícím poměru 12% CO₂, 20% He, 68% Ar. Směs plynu byla od

výrobce Airproducts a plyn je určen pro svařování uhlíkové konstrukční oceli. Plyn má pozitivní vliv na kvalitu svaru, výrazně zvětšuje hloubku závaru, omezuje možnost vzniku vad ve svarové housence. Plyn také má velký vliv na omezení rozstříku při svařování. Směs plynu se doporučuje pro celou škálu svařovacích drátů.

3.4. Příprava vzorku před vlastním svařováním:

Jako základní materiál byly použity plechy o tloušťce 8 mm. Plechy byly opracovány pomocí frézky. Plochy, kde měl navíc vzniknout koutový svar, byly ještě obroušeny pomocí kotoučové brusky. V poslední části přípravy základního materiálu tedy plechů následovalo bodování. Bodování bylo provedeno na koncích materiálu a to, tak aby plechy svíraly úhel 90°.

3.4.1. fáze: Návrh, provedení a vyhodnocení experimentů

3.4.1.1. Plán experimentů:

V první fázi byl proveden návrh plánu experimentů. Na základě předchozích zkušeností a podle již vytvořené metodiky [4], s využitím statistické metody centrální kompozice pro 2 proměnné v 5-ti úrovních. Základní proměnné doprovázející proces svařování jsou rychlost svařování v_s , a rychlost drátu v_d , které určují velikost plochy návaru P_n . Dle zkušenosti se pro návrh experimentů zvolily proměnné v_d a P_n . Součástí návrhu je graf, ve kterém je v_d vynesena na ose y, hodnoty v_s na ose x a jsou zde vyznačeny i jednotlivé konstantní plochy návaru P_n dopočítané ze vzorce $P_n = k \cdot (v_d/v_s)$.

Do grafu byly zaneseny body označující jednotlivé svary návrhu centrální kompozice, tyto body nám vymezily určitou oblast pro optimalizaci. Ostatní zvolené body uvnitř nebo vně uzavřeného obrazce (kromě centrálního bodu) znázorňují dodatečné experimenty.

3.4.1.2. Svařování a metalografické vyhodnocení:

Před vlastním svařováním byl vzorek (dvojice plechů o tloušťce 8mm) vložen do polohovadla, nastaven na správný úhel, dále pak následovalo nastavení svařovacího hořáku na správný úhel a seřízena vzdálenosti hořáku od povrchu svarku pomocí měrky a také nastavení vyosení svařovacího hořáku.

Jako další bylo nutné nastavení zvolených hodnot vzorků na svářečce, tedy hodnoty u každého vzorku proměnné jako hodnoty rychlost svařování vs [m/min.], rychlost podávání drátu vd [m/min.] a napětí na prázdko U_0 [V]. Jako další následovalo nastavení záznamového zařízení zaznamenávajícího hodnoty při svařování. Po provedení svaru za pomoci softwaru WeldMonitoring byly zjištěny a odečteny reálné hodnoty v průběhu svařování, tedy odečteny hodnoty proudu I [A], hodnota skutečného napětí U [V] a rychlost svařování vs [m/min.]. Svařený vzorek byl opatřen identifikačním číslem, aby nedošlo k jeho záměně.

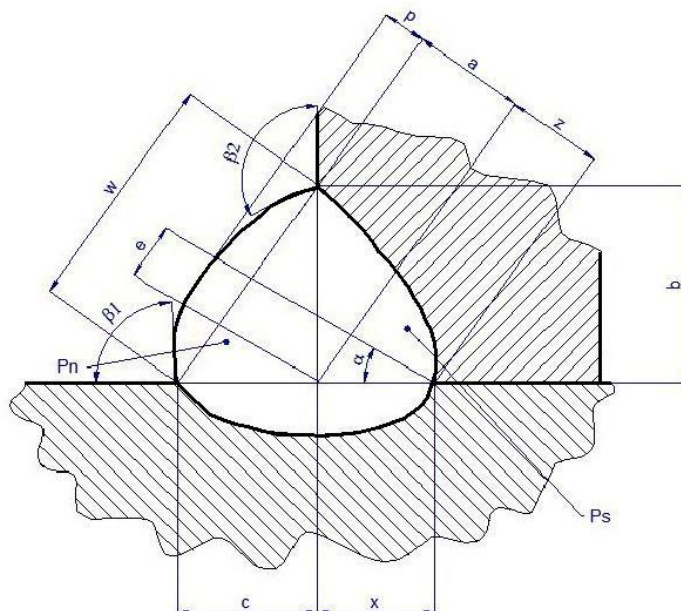
Po svaření následovalo dělení vzorků. Nejdříve se podélnými řezy kyslíkem odstranil přebytečný plech a pak se pomocí kotoučové pily chlazené emulzí provedl příčný výřez svaru cca. 25 mm. Takto nadělené vzorky byly pomocí razníků označeny pro lepší identifikaci.

Následovala příprava vzorků pro vyhodnocení. Nařezané vzorky byly zalité do dentakrylu. Po vytvrzení následovalo broušení vzorků za pomoci brusných kotoučů různé zrnitosti pod tekoucí vodou. Po broušení následovalo leštění vzorků na leštícím kotouči za přidávání kapalného brusiva. Po vyleštění vzorků následovalo jejich naleptání roztokem Nital 3 %, opláchnutí vodou a lihem a nakonec za pomoci elektrického fěnu osušení.

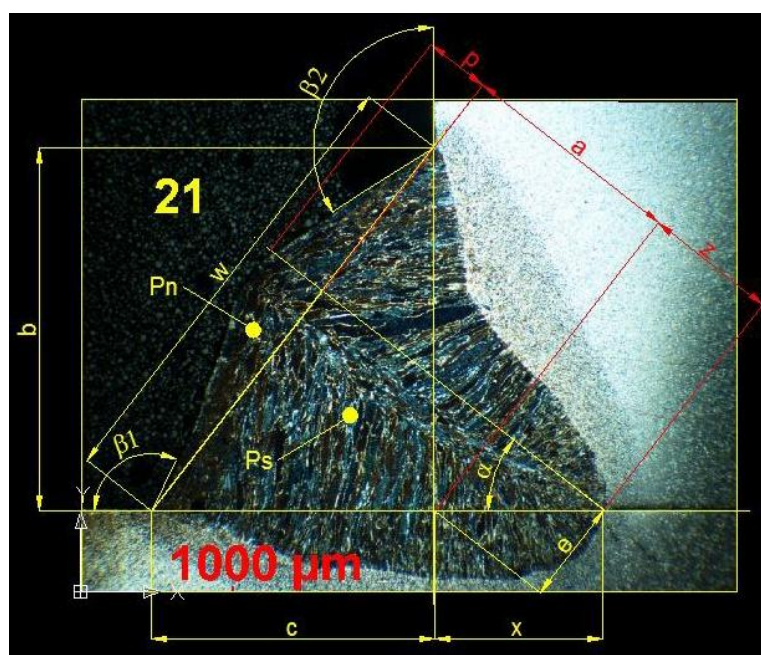
3.4.1.3. Geometrická analýza a posouzení přípustnosti dle norem jakosti:

V další fázi byly obrazy vzorků pomocí optického mikroskopu a kalibrované digitální kamery převedeny v digitální formě do programu NIS Elements. Větší vzorky ani při nejmenším zvětšení digitální kamera nezobrazila celé, proto byla použita starší metoda – nafocení vzorků digitálním fotoaparátem včetně Johansonovy měřky 10 mm a převedení do NIS Elements pomocí kalibrace. Program NIS Elements AR 2.3 slouží zejména ke geometrické analýze. Dle již zmíněné metodiky se provedlo měření délek a ploch a vyplnila zavedená tabulka. Součástí tabulky jsou i výpočty některých výstupních a pomocných ukazatelů jako je měrné vnesené teplo, vypočtená plocha návaru, zředění a účinnost tavení. Porovnáním skutečné a vypočtené

plochy návaru byla zhodnocena přesnost a věrohodnost naměřených veličin. Měření s vyšším rozptylem hodnot byla opakována. Dále byly svary posouzeny dle platné normy přípustnosti některých geometrických hodnot, zejména převýšení a úhlů přechodu svaru do základního materiálu a přípustnosti vad, zejména zápalů na stranách a pórů.



Obr.27 Znázornění měřených hodnot v programu NIS Elements na výbrusu svaru.



Obr.28 Znázornění měřených hodnot v programu NIS Elements na výbrusu reálného svaru.

3.4.2. fáze: Vyhodnocení ukazatelů optimalizace procesu: Efektivita provedení dle metodiky 1:

Další část experimentální práce byla zaměřena na zpracování získaných hodnot z proměřených vzorků, aby mohla být vypočtena a optimalizována efektivita provedení svarů podle již zpracovaných metodik. Pro určení efektivy a optimalizace byly použity dvě metodiky a každá ve dvou variantách. Každá z metodik má jiné kritériální hodnoty použité pro optimalizaci a tím i určení hodnoty efektivy. Hlavní kritérium dle metodiky 1 je hloubka závaru v ose svaru a podle metodiky 2 – hloubka závaru v ose x.

- metodika 1A (1, 2 jakost, kdy úhel provedeného svaru je min. 110°)
- metodika 1B (3 jakost, kdy úhel provedeného svaru je 90° až 110°)
- metodika 2A (1, 2 jakost, kdy úhel provedeného svaru je min. 110°)
- metodika 2B (3 jakost, kdy úhel provedeného svaru je 90° až 110°)

Pro první metodiku v obou variantách, jejich vyhodnocení a získání grafu optimalizace byl použit software Rgui. Pro zmíněný vyhodnocovací program bylo nutné nejdříve sestavení tabulky vstupních dat, tedy vytvoření souboru pro vstup do programu. Soubor dat se skládal, z pěti sloupců hodnot získaných při měření vzorků: rychlost podávání drátu V_d , rychlost svařování V_s , v_{max} znázorněné na obrázku, z_{max} taktéž vyplývající z uvedeného obrázku a v posledním sloupci byly uvedeny hodnoty změřené plochy návaru P_n . Takto vytvořený soubor dat byl načten do programu Rgui a zadány doplňující hodnoty pro vyhodnocení. Po dokončení výpočtů v programu byl získán graf optimalizace, hodnoty efektivy a hodnoty teoretické výšky V_t pro jednotlivé vzorky, která byla duplicitně použita i pro výpočet efektivy v tabulce.

Dále do tabulky byly zadány i výpočtové vzorce měrného vneseného tepla, vypočtené plochy návaru, poměru zředění a efektivy tavení. Nakonec byly vypočteny hodnoty PE, DE a FE dle následujících vzorců – pro metodiku 1 A:

$$PE = \frac{z}{V_t} \quad (11)$$

$$DE = \frac{a}{at} = \frac{v - z}{V_t - z} \quad (12)$$

Pro metodiku 1B byla použita stejná tabulka s upravenou hodnotou DE podle vzorce:

$$DE = \frac{v}{V_t} \quad (13)$$

Tímto způsobem byl upraven výpočtový program v R-qui.

Tato změna zvýšila podíl závaru a snížila význam převýšení při výpočtu efektivity provedení koutového svaru, takže při výpočtu efektivity přesáhl vliv svarů s úhly přechodu pod 110° až do 90° a tím se optimální oblast přesunula k vyšším parametrickým hodnotám.

3.4.3. Efektivita provedení dle metodiky 2:

Na rozdíl od metodiky 1. kde byla základní veličinou efektivity hodnota osového závaru svaru z, bez ohledu na to, jestli byl závar směřován do pásnice nebo do stykové plochy (nikoliv ve směru do stojny), metodika 2 má základní veličinu závar v ose x, čímž klade vyšší nároky na přesnost provedení, protože v případě většího rozptylu hodnot bude optimalizační pole nestabilní a bude potřeba mnohem více experimentů. Na druhé straně tento ukazatel vychází přímo z praxe.

Pro tuto metodiku zatím nebyl zpracován výpočetní program, ale pro získání grafického výstupu tedy grafu optimalizační oblasti byl použit program Statistica v7. K odvození vzorců pro metodiku 2 byly rovněž použity trigonometrické vztahy, výsledná rovnice nebyla kvadratická, ale kvartická a byla řešena pomocí software Derive 6. Výhodou tohoto řešení je, že na rozdíl od metodiky 1 dostaneme všechny potřebné geometrické hodnoty ideálního (optimalizovaného) trojúhelníku a můžeme si ho nakreslit. Při výpočtu efektivity závaru je hodnota závaru z ve směru osy svaru nahrazena hodnotou x závaru ve směru osy x, vzorce pro hodnotu efektivity návaru pro variantu A i B jsou tedy následující:

Pro metodiku 2A:

$$PE = \frac{x}{V_t} \quad (14)$$

$$DE = \frac{a}{at} = \frac{v - z}{vt - z} \quad (15)$$

$$FE = PE * DE \quad (16)$$

Pro metodiku 2B:

$$PE = \frac{x}{Vt} \quad (17)$$

$$DE = \frac{v}{Vt} \quad (18)$$

$$FE = PE * DE \quad (19)$$

Poznámka: v, V_t, a, a_t, z podle této metodiky není shodné s hodnotami podle metodiky 1. Jedinou shodnou hodnotou je osový závar x.

3.5. Tabulka rozsahu parametrů a návrhu experimentů pro drát průměru 0,8mm

(uvedena jen 2. série - „konzervativní“ návrh pro proměnné vd a vs):

Tab.1

-	-v2	-1	0	+1	+v2
vd	17	17,9	20	22,1	23
vs	0,65	0,75	1	1,25	1,35

Tab.2

svar	vd	vs	vd	vs	I	U	vs skut
1	-1	-1	17,9	0,75	234	24,7	0,446
2	-1	1	17,9	1,25	234	24,4	1,254
3	1	-1	22,1	0,75	271	25,2	0,748
4	1	1	22,1	1,25	273	24,8	1,26
5	0	-v2	20	0,65	271	25,1	0,634
6	0	+v2	20	1,35	251	24,8	1,367
7	-v2	0	17	1	227	24,4	0,98
8	+v2	0	23	1	282	25,3	0,99
9	0	0	20	1	243	25	0,99
10	0	0	20	1	246	25	0,83
11	0	0	20	1	246	24,9	1,17

x1 0.009141 0.025047 0.365 0.72206

x2 -0.041487 0.018634 -2.226 0.04783 *

x12 -0.056594 0.018069 -3.132 0.00954 **

x22 -0.018060 0.019231 -0.939 0.36785

x1x2 -0.013905 0.025218 -0.551 0.59239

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.04765 on 11 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.6255, Adjusted R-squared: 0.4553

F-statistic: 3.675 on 5 and 11 DF, p-value: 0.03358

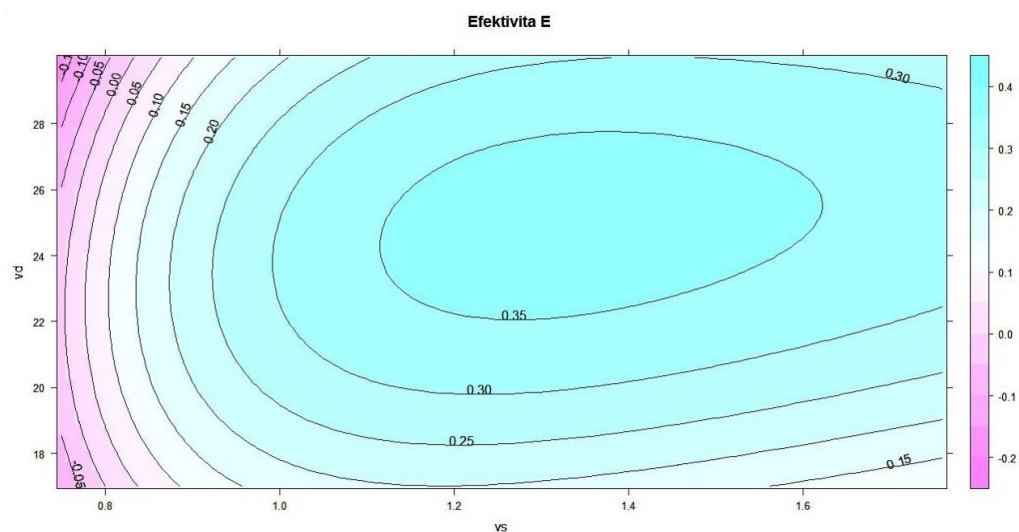
$E = 0.3154271 - 0.04148665 P_s - 0.05659426 v_d^2$

Optimální řešení:

$E = 0.342177$ $v_d = 24.57034$

$P_s = 7.629243$ $v_s = 1.481452$

Graf č.2 efektivity metodiky 1A získaný z Rgui (závislost rychlosti drátu na rychlosti svařování):



Získané a vypočtené hodnoty pro zhotovení grafu viz. tabulka v příloze č. 2 (konečná tabulka hodnot pro metodiku 1A).

3.6.2. Metodika 1B pro drát průměru 0,8mm:

Hodnoty získané z programu Rgui pro metodiku 1B:

lm(formula = Ef ~ x1 + x2 + x12 + x22 + x1x2)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.104724	-0.031353	0.001143	0.037658	0.058944

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	0.34455	0.02267	15.198	9.92e-09 ***
x1	0.01935	0.02897	0.668	0.5180
x2	-0.04402	0.02155	-2.042	0.0659 .
x12	-0.06150	0.02090	-2.943	0.0134 *
x22	-0.02154	0.02224	-0.968	0.3537
x1x2	-0.01610	0.02917	-0.552	0.5920

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.05512 on 11 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.6362, Adjusted R-squared: 0.4708

F-statistic: 3.847 on 5 and 11 DF, p-value: 0.02922

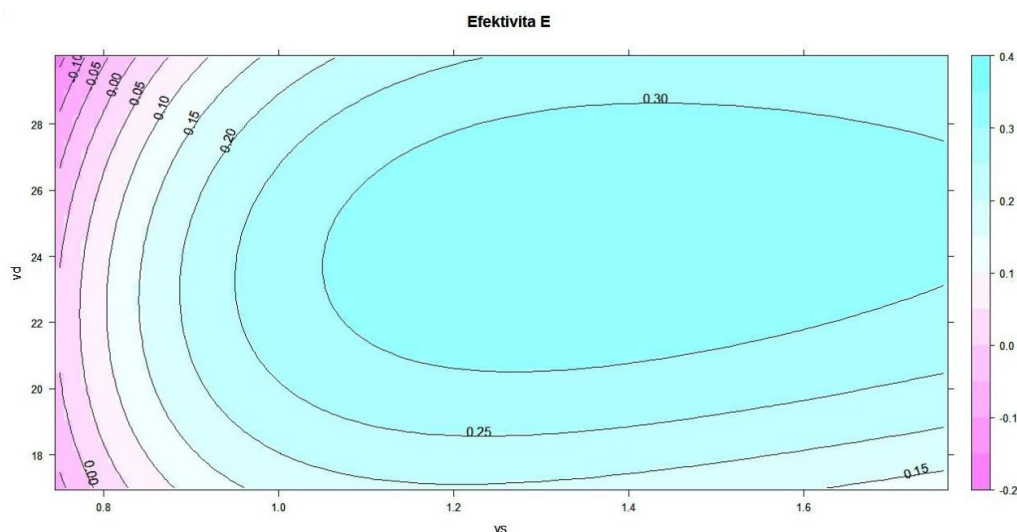
$E = 0.3445528 - 0.06150224 v_d^2$

Optimální řešení:

$E = 0.3725198 \quad v_d = 24.90664$

$P_s = 7.878069 \quad v_s = 1.454297$

Graf č.3 efektivity metodiky 1B získaný z Rgui (závislost rychlosti drátu na rychlosti svařování):



Získané a vypočtené hodnoty pro zhotovení grafu viz. tabulka v příloze č. 3 (konečná tabulka hodnot pro metodiku 1B).

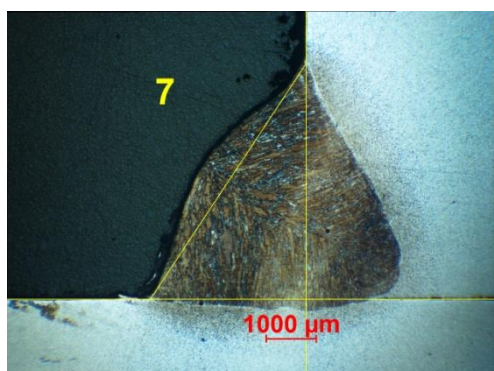
Zhodnocení výsledků experimentů – drát 0,8, metodika1:

Optimalizace drátu 0,8 mm se ukázala jako dosud nejobtížnější. Tenký drát měl vysokou citlivost na nastavení geometrie hořáku, především vyosení dráhy a vzdálenost špičky nad povrchem. Podle očekávání se oblast maximální efektivity posunula směrem k vyšší rychlosti drátu a zejména rychlosti svařování, což se projevilo v převýšení svaru a ve špatné smáčivosti na přechodu do základního materiálu, zejména směrem k pásnici, kde je 30° úhel. Výsledkem byla zhruba jen poloviční výtěžnost dle normy přijatelných svarů, které mohly být zahrnuty do optimalizace. Dalším problémem byl počáteční odhad středového bodu a rozsahu parametrů. Metoda středové kompozice vyžaduje dobrou znalost technologie a dobrý přibližný odhad optimální parametrické oblasti. Pokud to chybí je potřeba použít jinou statistickou metodu nebo vhodně zvolit pár předběžných experimentů pro zvýšení přesnosti odhadu. Nakonec bylo rozhodnuto zvolit přímo středovou kompozici ale v dostatečně širokém rozsahu parametrů. Výsledkem byl soubor svarů, který byl použitelný jen z dolní poloviny parametrů. Následoval další soubor měření v dolní části parametrické oblasti. Tady byly použitelné všechny svary ale zjevně mimo oblast maximální efektivity. Proto byly

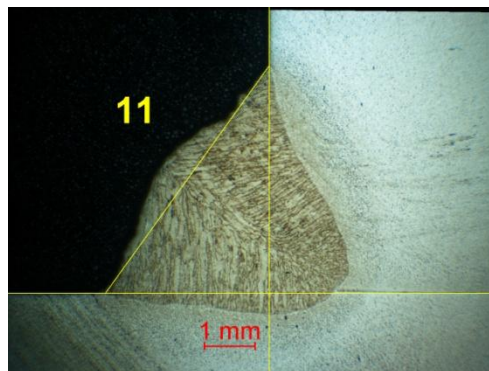
přidány ještě další zkušební svary k propojení těchto dvou oblastí. Teprve pak se z dobrých svarů provedla optimalizace – graf č.1.

Z porovnání varianty 1 a 2 je patrné, že mezi výsledky není tak výrazný rozdíl, protože převládá vliv převýšených svarů, takže efektivita návaru je obecně nízká, stejně jako počet svarů, vyhovujících podmínkám 1. jakosti. Tím je dána i nízká maximální hodnota celkové efektivity. Statisticky obě varianty splňují kritérium spolehlivosti přes 95%, i když ve zredukované rovnici lineární závislosti dominuje kvadrát rychlosti drátu.

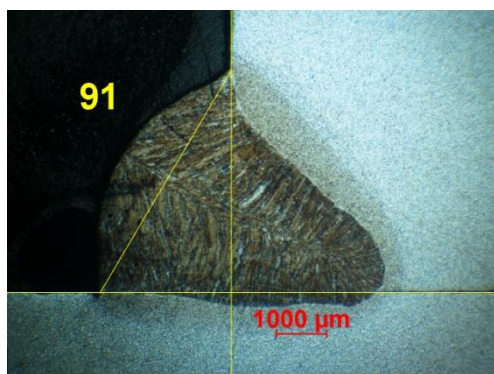
Můžeme si to demonstrovat porovnáním svarů o návarové ploše cca 8 mm².



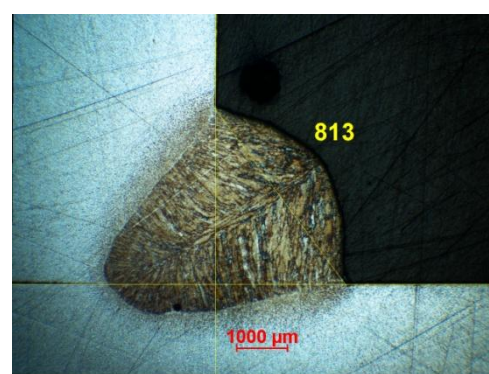
Obr.29



Obr.30



Obr.31



Obr.32

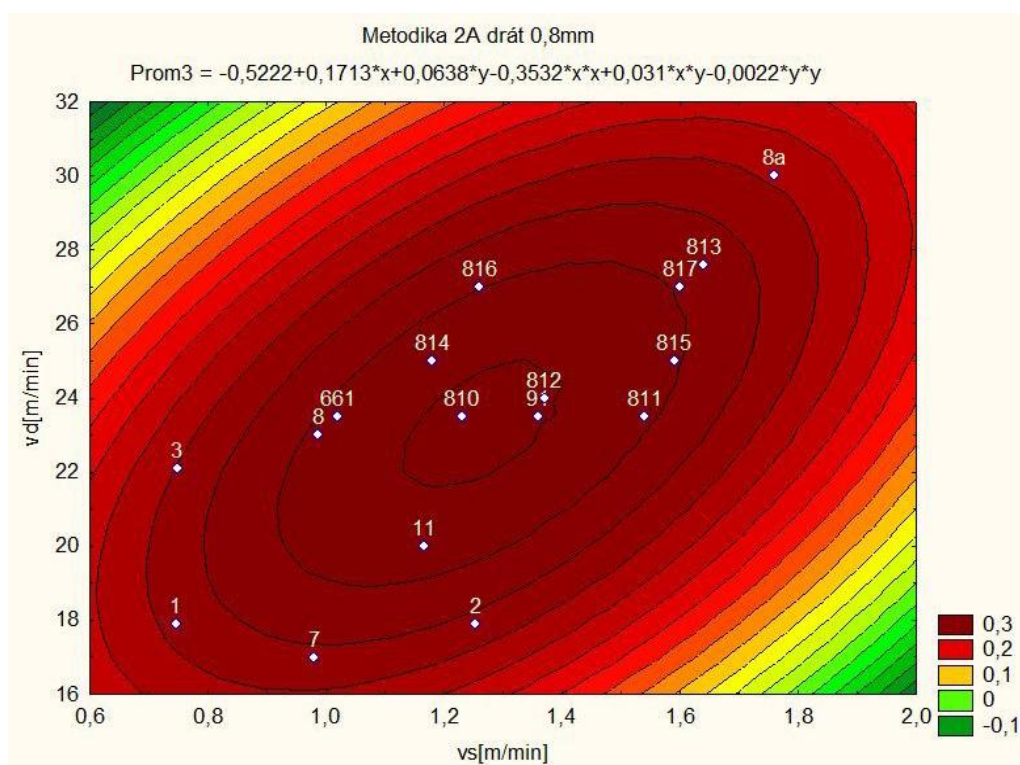
Tab.3

VZ	Vd	Vs	I	Q	v	z	PE	DE	FE
7	17,0	0,98	227	2,9	3,54	0,91	0,244	0,949	0,232
11	20,0	1,17	246	2,7	3,65	1,01	0,257	0,93	0,239
91	23,5	1,36	300	2,9	4,72	2,5	0,469	0,885	0,415
813	27,6	1,64	294	2,3	3,80	1,68	0,40	0,89	0,35

Z tabulky je patrné, že při stejné ploše návaru závar a efektivita závaru výrazně roste s rychlostí drátu a tím i velikostí proudu v kombinaci s rychlostí svařování. Naopak efektivita návaru klesá vlivem rostoucího převýšení svaru. Svar 91 je nejbližší optima u obou variant metodiky 1.

3.6.3. Metodika 2A pro drát průměru 0,8mm:

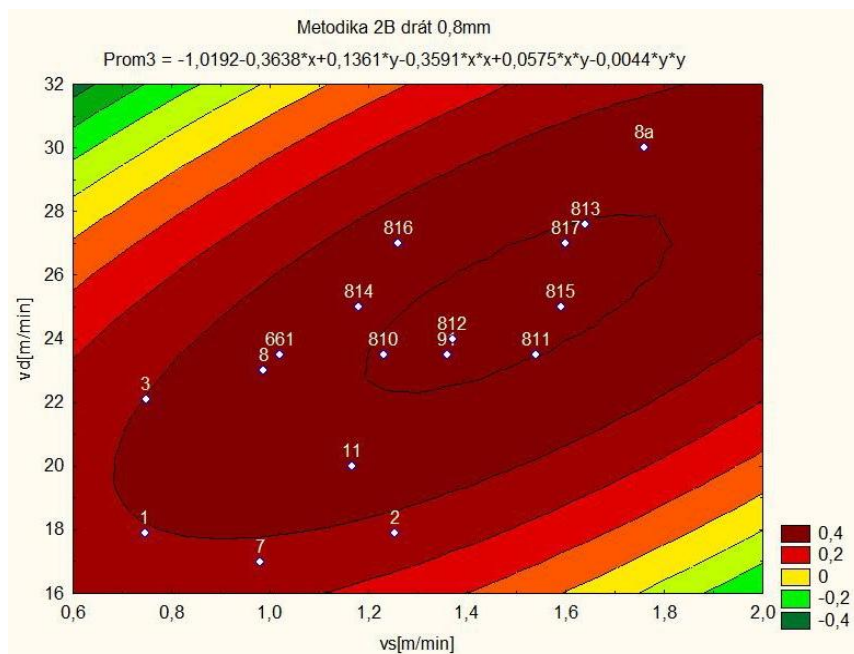
Graf č.4 efektivity pro metodiku 2A (závislost rychlosti drátu na rychlosti svařování):



Získané a vypočtené hodnoty pro zhotovení grafu viz. tabulka v příloze č. 4 (konečná tabulka hodnot pro metodiku 2A).

3.6.4. Metodika 2B pro drát průměru 0,8mm:

Graf č.5 efektivity pro metodiku 2B (závislost rychlosti drátu na rychlosti svařování):



Získané a vypočtené hodnoty pro zhotovení grafu viz. tabulka v příloze č. 5 (konečná tabulka hodnot pro metodiku 2B).

Tab.4

2B 0,8mm	VZ	Vd	Vs	x	v	P _N	c _v	b _v	V _t	PE	DE	FE
	810	23,5	1,23	2,78	4,54	10,3	3,593	5,750	5,40	0,515	0,841	0,433
	812	24,0	1,37	2,00	3,90	8,7	3,440	5,035	4,50	0,445	0,867	0,385
	815	25,0	1,59	2,14	3,83	8,0	3,241	4,937	4,50	0,476	0,851	0,405

Tab.5

VZ	Vd	Vs	I	U	x	x _{max}	c	b	a	z	z _{max}	v	v _{max}	p	w	β	e	α
810	23,5	1,23	292	25,0	2,78	2,81	2,81	3,12	2,39	2,12	2,49	4,54	4,86	1,36	4,9	89-100	1,80	41
812	24,0	1,37	296	25,3	2,00	2,17	3,46	3,53	2,48	1,42	2,14	3,90	4,61	0,86	4,9	122-106	1,42	45
815	25,0	1,59	293	25,3	2,14	2,2	2,73	3,5	2,14	1,68	1,7	3,83	3,85	1,13	4,5	92-104	1,29	38

Z tabulky a předešlého grafu je patrné, že metodika 2B zahrnuje rozsáhlejší oblast než metodika 2A. To má za následek, že oblast maximální efektivity se blíží limitním hodnotám převýšení a přechodových úhlů z hlediska jakosti. Příkladem jsou svary 815, 813, které jsou na hranici přijatelnosti a dokonce i svar 817, který má již nepřijatelnou geometrii. Při metodice 2A jsou mimo

optimum ale dle metodiky 2B patří mezi svary s nejvyšší efektivitou. V tab.4 jsou uvedeny vzorky 810,812, které vyhovují jak pro metodiku 2A tak i 2B, je zde uveden i vzorek 815 vyhovující pouze metodice 2B. Na těchto vzorcích lze porovnat parametry svařování, geometrii a výsledné FE.

3.7. Tabulka rozsahu parametrů a návrhu experimentů pro drát průměru 1mm (uvedena jen 1.série-původní návrh):

Tab.6

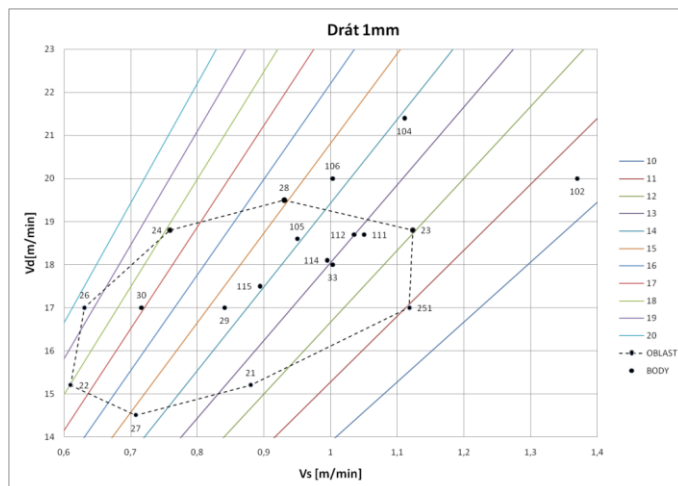
-	-v2	-1	0	+1	+v2
Vd	14,5	15,2	17,0	18,8	19,5
P _N	11,0	12,2	15,0	17,8	19,0
Vs	0,95	0,90	0,82	0,76	0,74

Tab. 7

č. vzorku	Vd	P _N	Vd	P _N	Vs	I	U ₀	U	Vs	CT _{wd}
21	-1	-1	15,2	12,2	0,90	293	24,9	26,4	0,880	12,5
22	-1	+1	15,2	17,8	0,61	295	25,0	26,6	0,610	13,5
23	+1	-1	18,8	12,2	1,11	347	25,7	27,1	1,123	12,5
24	+1	+1	18,8	17,8	0,76	338	25,7	27,2	0,759	13,0
25	0	-v2	17,0	11,0	1,11	330	25,3	26,7	1,118	12,0
26	0	+v2	17,0	19,0	0,64	316	25,4	27,0	0,631	13,0
27	-v2	0	14,5	15,0	0,70	289	24,8	26,4	0,708	12,5
28	+v2	0	19,5	15,0	0,94	344	25,9	27,4	0,930	12,5
29	0	0	17,0	15,0	0,82	316	25,3	27,0	0,841	12,5
30	0	+1	17,0	17,0	0,72	317	25,4	26,9	0,716	13,0
31	0	-1	17,0	13,0	0,95	314	25,4	26,9	0,936	12,5
33	-	-	18,0	13,0	1,00	329	25,5	27,0	1,000	12,5

3.8. Hodnoty získané z měření a výpočtem pro drát pr. 1mm:

Graf č.6 návrhu experimentu optimalizace drátu 1mm (experimentální pole dle centrální kompozice):



Celková tabulka získaných a dopočtených hodnot pro drát 1mm viz. tabulka č. 6 v příloze.

Pro metodiku 1A a její výpočet byly použity hodnoty z programu Rgui s označením E.f. 101 a vt.101(viz. tab. v příloze). Podobně pro metodiku 1B hodnoty E.f. 102 a vt.102. Díky tomuto programu byly získány jak vypočtené hodnoty, tak i grafické výstupy efektivity pro metodiku 1A i 1B. Po získání těchto hodnot následovalo sestavení a dopočtení konečné tabulky odlišné pro každou metodiku.

3.8.1. Metodika 1A pro drát průměru 1mm:

Hodnoty získané z programu Rgui pro metodiku 1A:

Call:

lm(formula = Ef ~ x1 + x2 + x12 + x22 + x1x2)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.027579	-0.008007	-0.002924	0.007877	0.028987

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	0.370106	0.006662	55.555	< 2e-16 ***
x1	0.002559	0.005327	0.480	0.638922
x2	-0.012307	0.004760	-2.585	0.022623 *
x12	-0.030891	0.006129	-5.040	0.000227 ***
x22	-0.010495	0.005790	-1.812	0.093065 .
x1x2	0.006499	0.008075	0.805	0.435383

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01595 on 13 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.7607, Adjusted R-squared: 0.6687

F-statistic: 8.267 on 5 and 13 DF, p-value: 0.00105

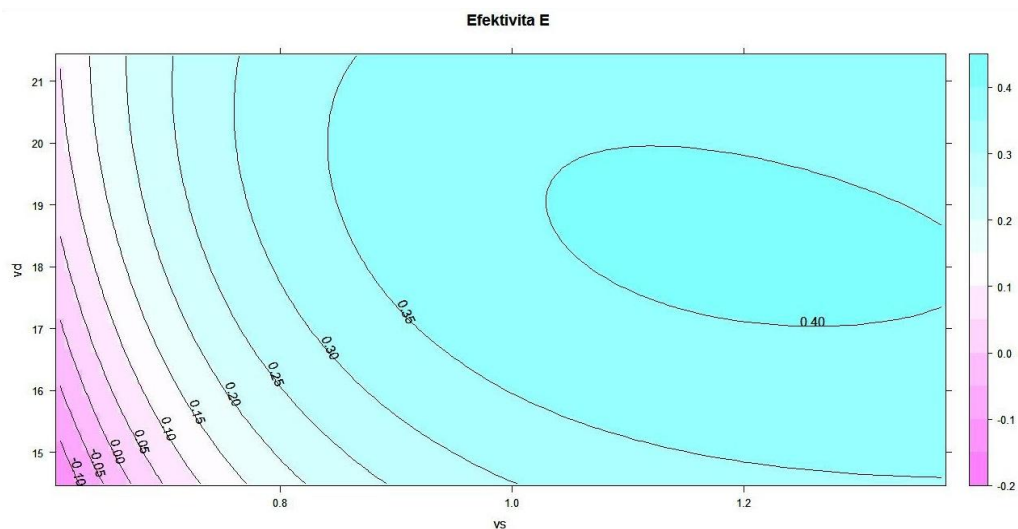
E=0.3701064 -0.01230724 P_s -0.03089057 v_d^2

Optimální řešení:

E= 0.3737277 P_s = 14.88784

v_d = 17.8989 v_s = 1.250339

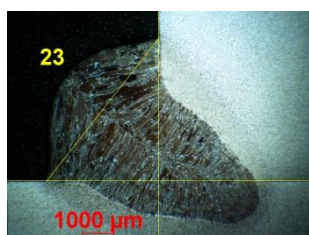
Graf č.7 efektivity metodiky 1A získaný z Rgui (závislost rychlosti drátu na rychlosti svařování):



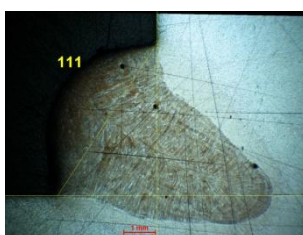
Získané a vypočtené hodnoty pro zhotovení grafu viz. tabulka v příloze č. 7 (konečná tabulka hodnot pro metodiku 1A).

Komentář:

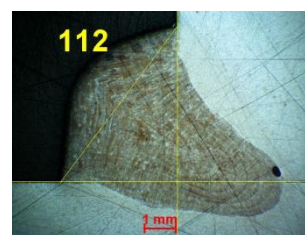
Vybrané vzorky svarů nejvíce se blíží středu oblasti optimalizace pro metodiku 1A drátu 1mm. Na následujících obr. 33, 34, 35 je vidět výbrus vzorku svaru. Je zde vidět přijatelné převýšení a také dobrá hloubka závaru.



Obr. 33



Obr.34



Obr.35

Tab. 8

1A 1mm									
VZ	V _d	V _s	Z _{max}	V _{max}	P _N	V _t	PE	DE	FE
23	18,8	1,123	3,02	5,83	13,7	6,503	0,46438	0,80671	0,37462
111	18,7	1,050	3,16	5,80	13,0	6,535	0,48355	0,78224	0,37825
112	18,7	1,035	2,95	5,88	14,4	6,535	0,45141	0,81729	0,36894

3.8.2. Metodika 1B pro drát průměru 1mm:

Hodnoty získané z programu Rgui pro metodiku 1B:

lm(formula = Ef ~ x1 + x2 + x12 + x22 + x1x2)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.022690	-0.008073	-0.001744	0.008189	0.027100

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	0.399327	0.006679	59.789	< 2e-16 ***
x1	0.020989	0.005340	3.930	0.001724 **
x2	-0.015881	0.004772	-3.328	0.005450 **
x12	-0.026549	0.006145	-4.320	0.000831 ***
x22	-0.008277	0.005805	-1.426	0.177495
x1x2	0.011326	0.008096	1.399	0.185219

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.016 on 13 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.8382, Adjusted R-squared: 0.776

F-statistic: 13.47 on 5 and 13 DF, p-value: 9.317e-05

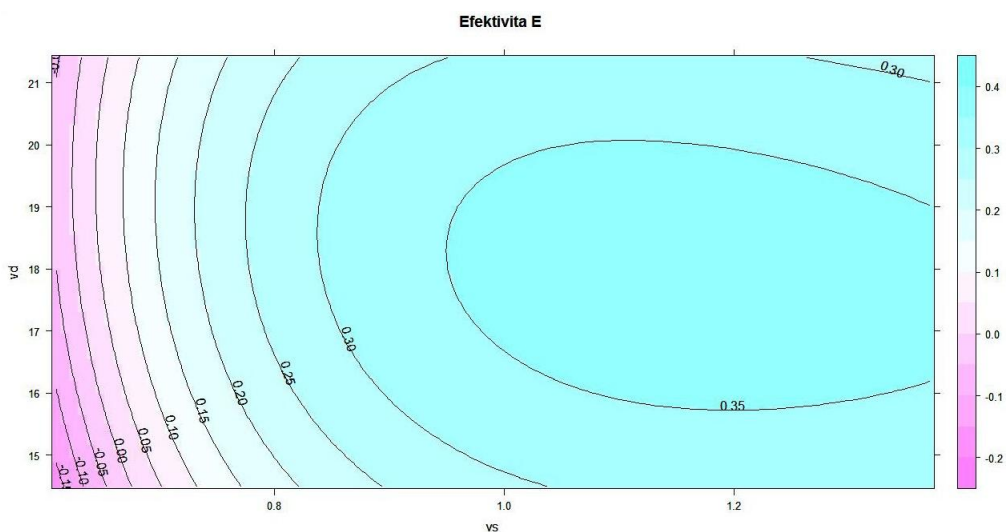
$E = 0.3993270 + 0.02098888 v_d - 0.01588053 P_s - 0.02654932 v_d^2$

Optimální řešení:

$E = 0.4080744$ $P_s = 14.16231$

$v_d = 18.49458$ $v_s = 1.358138$

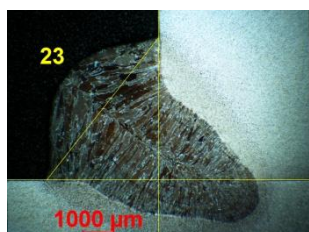
Graf č.8 efektivity metodiky 1B získaný z Rgui (závislost rychlosti drátu na rychlosti svařování):



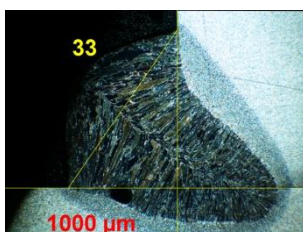
Získané a vypočtené hodnoty pro zhotovení grafu viz. tabulka v příloze č. 8 (konečná tabulka hodnot pro metodiku 1B).

Komentář:

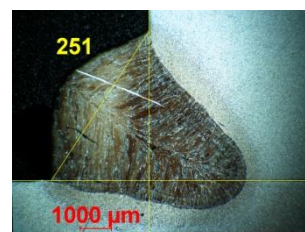
Vybrané vzorky svarů nejvíce se blíží středu oblasti optimalizace pro metodiku 1B drátu 1mm. Na obr. 36, 37, 38 jsou výbrusy svarů, které nejlépe vyhovují dle použití metodiky 1B. Odlišující se svar, ale i přesto vyhovující je na Obr. 38 na tomto svaru lze pozorovat rozdíl na obou přechodových úhlech a převýšení, ale také na směru a hloubce závaru, která je odlišná od svarů na obr. 36, 37.



Obr.36



Obr.37



Obr.38

Tab.9

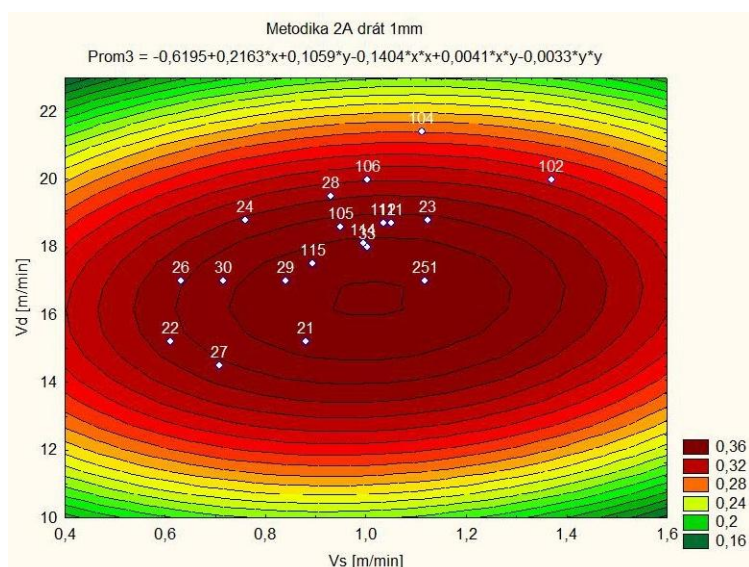
1B 1mm									
VZ	V _d	V _s	z _{max}	v _{max}	P _N	V _t	PE	DE	FE
23	18,8	1,123	3,02	5,83	13,7	6,503	0,46438	0,89647	0,4163
33	18,0	1,003	2,91	5,78	15,0	6,578	0,44236	0,87864	0,38868
251	17,0	1,118	2,61	5,24	12,1	5,905	0,44203	0,88745	0,39229

Z porovnání varianty 1 a 2 je patrný výraznější rozdíl, než u drátu 0,8mm, optimum dle met.1B se posunulo o 0,6 m/min v_d a o 0,11 m/min v_s proti metodě 1A. Podstatně se zvýšil podíl přijatelných svarů dle normy a to se projevilo ve zvýšení statistické spolehlivosti přes 99%. I když i zde převažují vypouklé svary a zejména úhel přechodu do pásnice se velmi často blíží 90°, jen vyjímečně jej podkročí. Ve zredukované rovnici lineární závislosti opět dominuje kvadrát rychlosti drátu, ale významný je i podíl plochy návaru a tím i rychlosti svařování. Přesnost vyosení dráhy tak, aby maximální závar směřoval do styčné plochy a tím se i zvýšila použitelnost metodiky 2.

3.8.3. Metodika 2A pro drát průměru 1mm:

Pro získání grafů pro metodiku 2A i 2B byl použit software Statistica v7. Díky tomuto programu bylo možné zadání dat potřebných pro metodiku 2 a následné vygenerování grafů optimalizované oblasti jak pro metodiku 2A tak i pro 2B.

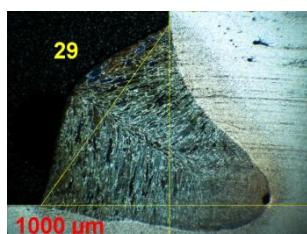
Graf č.9 efektivity pro metodiku 2A (závislost rychlosti drátu na rychlosti svařování):



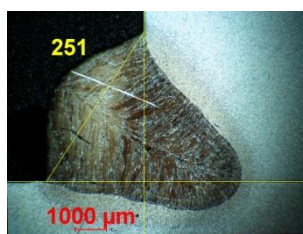
Získané a vypočtené hodnoty pro zhotovení grafu viz. tabulka v příloze č. 9 (konečná tabulka hodnot pro metodiku 2A).

Komentář:

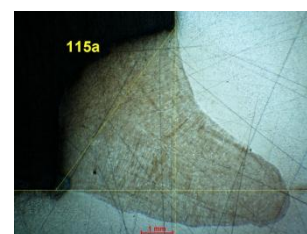
Vybrané vzorky svarů nejvíce se blížíci středu oblasti optimalizace pro metodiku 2A drátu 1mm. Na následujícím obr. 39 je vidět svar, který má vhodné převýšení, náběžné úhly převýšení i hloubku závaru. Na obr. 40 je vidět jak se změní tvar i výška převýšení oproti obr. 39 při zachování rychlosti podávání drátu, ale zvýšené rychlosti svařování. Dochází zde i k zúžení svaru. Naopak na obr. 41 je vidět velká změna tvar i hloubka závaru při rozdílné rychlosti svařování a při zvýšené rychlosti podávání drátu. Opět lze změnu nejlépe porovnat při pohledu na obr.39.



Obr.39



Obr.40



Obr.41

Tab.10

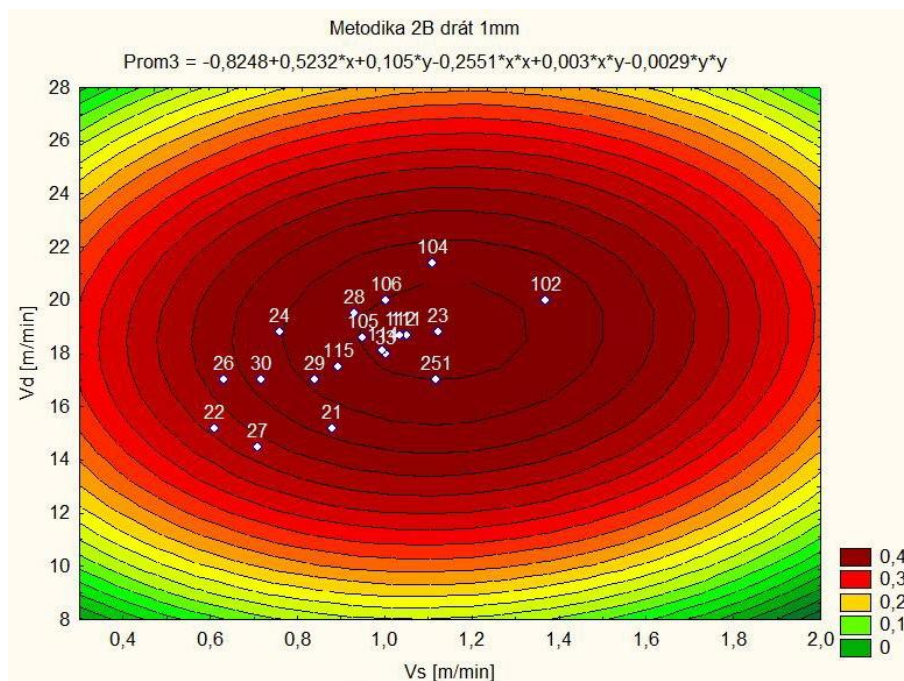
2A 1mm														
VZ	Vd	Vs	x	v	P _N	c _v	b _v	V _t	α	z	PE	DE	FE	
29	17,0	0,841	3,15	5,90	16,9	4,701	7,190	6,57	33°10′	3,763	0,479	0,761	0,365	
251	17,0	1,118	3,11	5,20	12,1	3,872	6,250	5,94	31°46′	3,658	0,524	0,677	0,355	
115	17,5	0,894	3,28	5,73	15,8	4,488	7,041	6,55	32°30′	3,889	0,501	0,692	0,346	

Tab.11

VZ	Vd	Vs	I	U	x	x _{max}	c	b	a	z	z _{max}	v	v _{max}	p	w	β	e	α
29	17,0	0,841	316	27,0	3,15	3,26	4,11	5,74	3,35	2,52	2,57	5,90	6,40	1,29	7,1	119-106	1,8	36,0
251	17,0	1,118	330	26,7	3,11	3,11	3,13	4,79	2,62	2,61	2,61	5,20	5,24	1,34	5,7	118-92	1,7	36,0
115	17,5	0,894	332	26,7	3,28	3,28	3,90	5,18	3,13	2,62	3,04	5,73	6,20	1,57	6,4	108-104	2,0	37,0

3.8.4. Metodika 2B pro drát průměru 1mm:

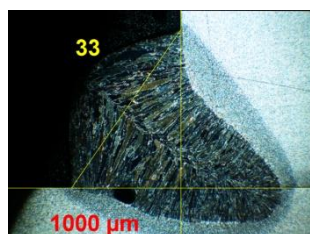
Graf č.10 efektivity pro metodiku 2B (závislost rychlosti drátu na rychlosti svařování):



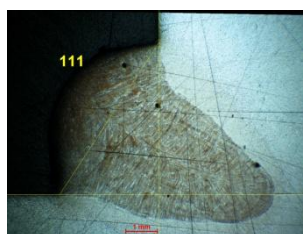
Získané a vypočtené hodnoty pro zhotovení grafu viz. tabulka v příloze č. 10 (konečná tabulka hodnot pro metodiku 2B).

Komentář:

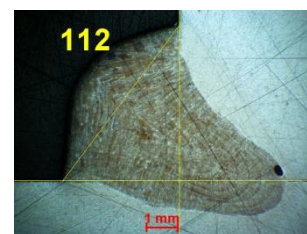
Vybrané vzorky svarů nejvíce se blížíci středu oblasti optimalizace pro metodiku 2B drátu 1mm. Na obr. 42,43,44 jsou svary, které mají málo odlišnou rychlost svařování. Na obr.42 je vidět rozdíl v úhlu i tvaru převýšení je to dáno nižší rychlostí podávání drátu než jaká je u svarů na obr. 43, 44.



Obr.42



Obr.43

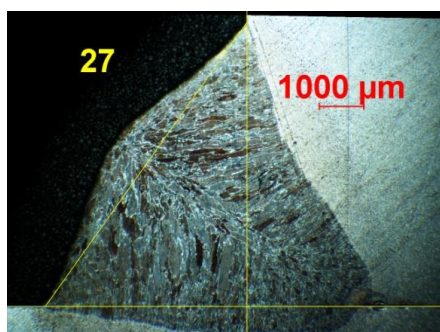


Obr.44

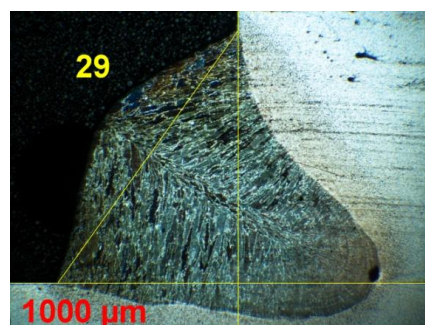
Tab.12

2B 1mm											
VZ	Vd	Vs	x	v	P _N	c _v	b _v	V _t	PE	DE	FE
33	18,0	1,003	3,19	5,50	15,0	4,374	6,859	6,38	0,500	0,862	0,431
111	18,7	1,050	3,63	5,67	13,0	3,924	6,626	6,50	0,559	0,872	0,487
112	18,7	1,035	3,39	5,65	14,4	4,224	6,818	6,47	0,524	0,873	0,457

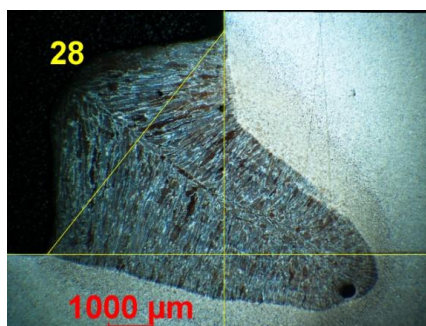
Na následujících ukázkách svarů obr.45, obr.46, obr.47 jde vidět, jak postupně směrem k vyšším hodnotám narůstá velikost převýšení u svarů, které mají stejnou plochu, ale postupně narůstá rychlost drátu i rychlost svařování. Zároveň i narůstá hloubka závaru.



Obr. 45



Obr.46



Obr.47

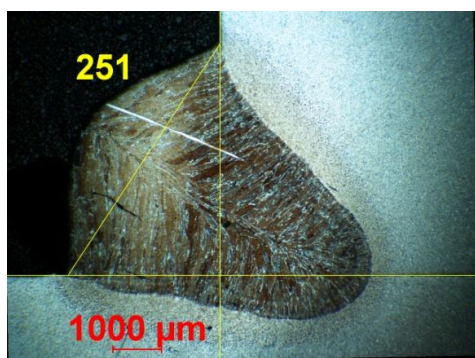
Tab.13

VZ	Vd	Vs	I	v	z	p	β	w	PE	DE	FE
27	14,5	0,708	289	5,70	2,06	0,83	137-119	7,8	0,412	0,926	0,382
29	17,0	0,841	316	5,90	2,52	1,29	119-106	7,1	0,479	0,898	0,43
28	19,5	0,930	344	5,80	2,66	1,83	106-101	6,5	0,495	0,853	0,422

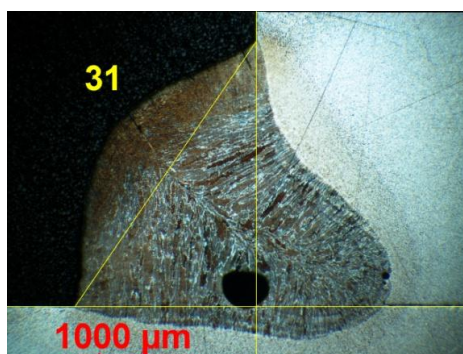
Na obr. 45, 46, 47 jsou svary provedené drátem 1mm blížících se přímce spojující plochu 15. Svary názorně demonstrují vliv rostoucích hodnot vd a vs při jejich stálém poměru na geometrii svaru – rostoucím závaru a převýšení a

též vliv na kvalitu svarů z hlediska tvarové přijatelnosti vzhledem k efektivitě provedení.

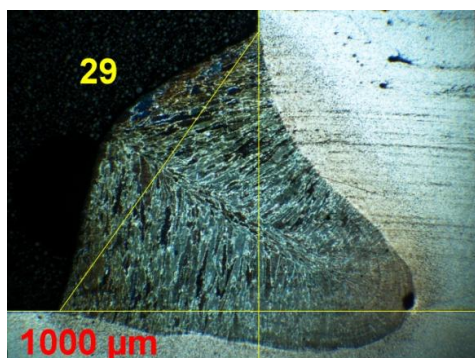
Svary označené 251 obr.48 a 31 obr. 49 jsou svary, které se přibližují optimu je zde vidět přijatelné převýšení obr.48, 49. Na následujících ukázkových obrázcích svarů 50, 51, 52 je vidět jak se mění úhel tvar i velikost převýšení. Tvarové změny na následujících obrázcích jdou postupně za sebou, směrem vzdalujícím se od optima svary tedy byly provedeny postupně za konstantní rychlosti podávání drátu a snížené rychlosti svařování.



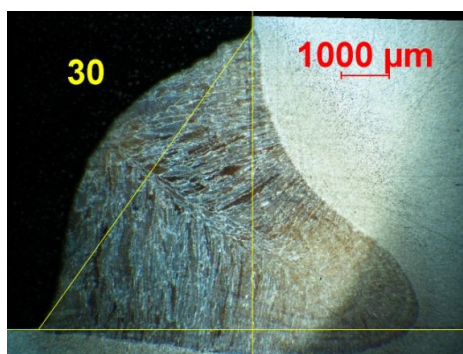
Obr.48



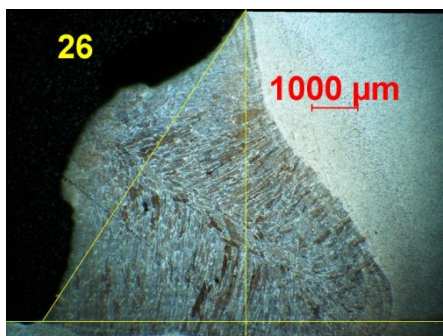
Obr.49



Obr.50



Obr.51



Obr.52

Na obr. 48, 49, 50, 51, 52 jsou svary provedené drátem 1mm, při konstantní rychlosti podávání drátu 17m/min.

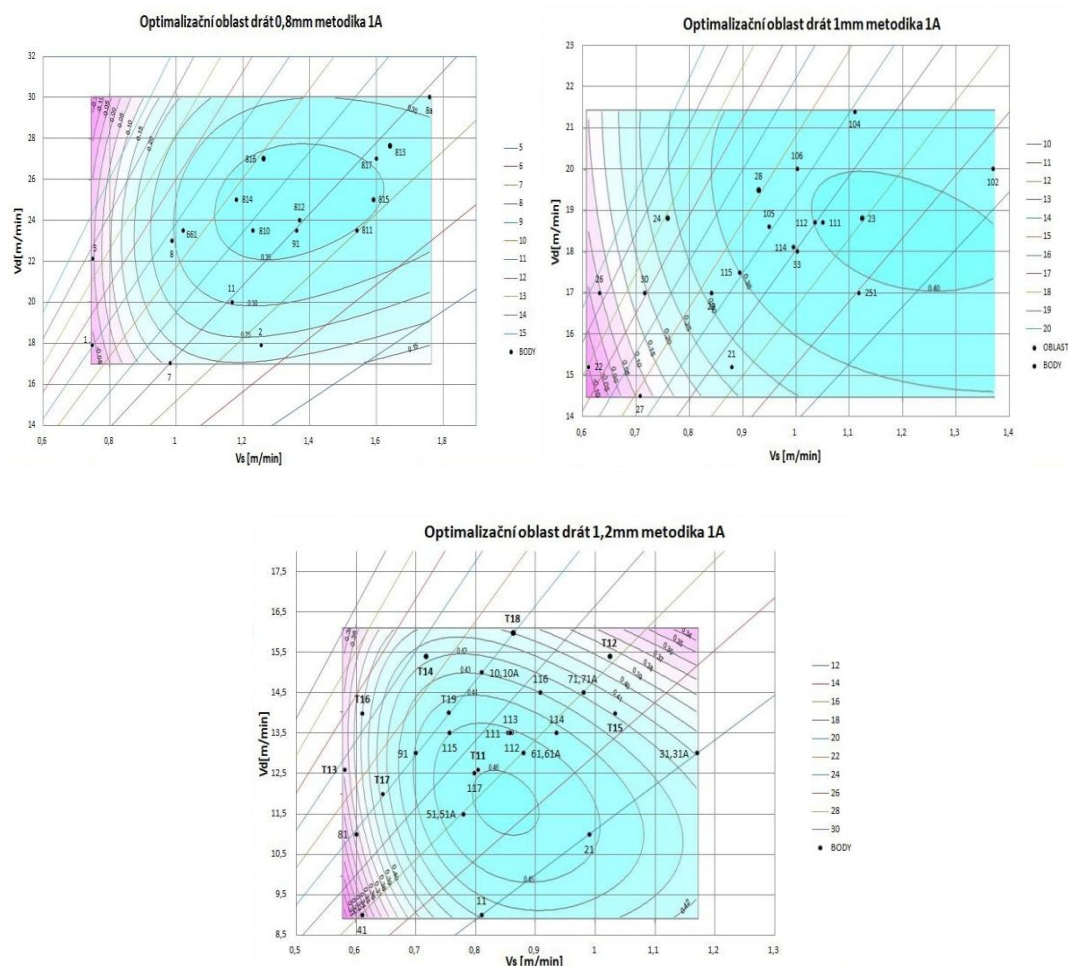
Tab.14

VZ	Vs	Pn	p	v	z	w	β	PE	DE	FE
26	0,631	20,9	1,53	6,40	2,64	8,1	144-120	0,451	0,910	0,410
30	0,716	19,7	1,20	6,40	2,68	7,7	119-103	0,472	0,911	0,430
29	0,841	16,9	1,29	5,90	2,52	7,1	119-106	0,479	0,898	0,430
31	0,950	15,9	1,35	5,30	2,17	6,7	120-110	x	x	x
251	1,118	12,1	1,34	5,20	2,61	5,7	118-92	0,524	0,876	0,459

V tab.11 je patrná závislost geometrie svaru na rychlosti svařování. Se zvyšující vs se svar zužuje, roste závar i převýšení, což má za důsledek snižování úhlů přechodu do materiálu, PE roste, DE klesá, takže jejich násobek FE vytváří křivku, která stoupá k maximální hodnotě a klesá, čímž vytváří optimum, jehož umístění je dáno metodikou výpočtu. Zhodnocení těchto metodik můžeme provést s ohledem na účel použití, kvalitu, produktivitu.

4. Konečné zhodnocení a porovnání výsledků:

4.1. Koncové porovnávací grafy pro metodiku 1A pro jednotlivé průměry drátů:



Obr.53 Srovnání grafů pole optimalizace pro metodiku 1A postupně dle průměru drátu tedy 0,8, 1, 1,2mm.

Tab.15

1A 0,8mm									
VZ	V _d	V _s	Z _{max}	V _{max}	P _N	V _t	PE	DE	FE
91	23,5	1,36	2,5	4,72	9,1	5,335	0,46857	0,78297	0,36688
810	23,5	1,23	2,49	4,86	10,3	5,522	0,45092	0,78164	0,35245
812	24,0	1,37	2,14	4,61	8,7	4,940	0,43317	0,88204	0,38207

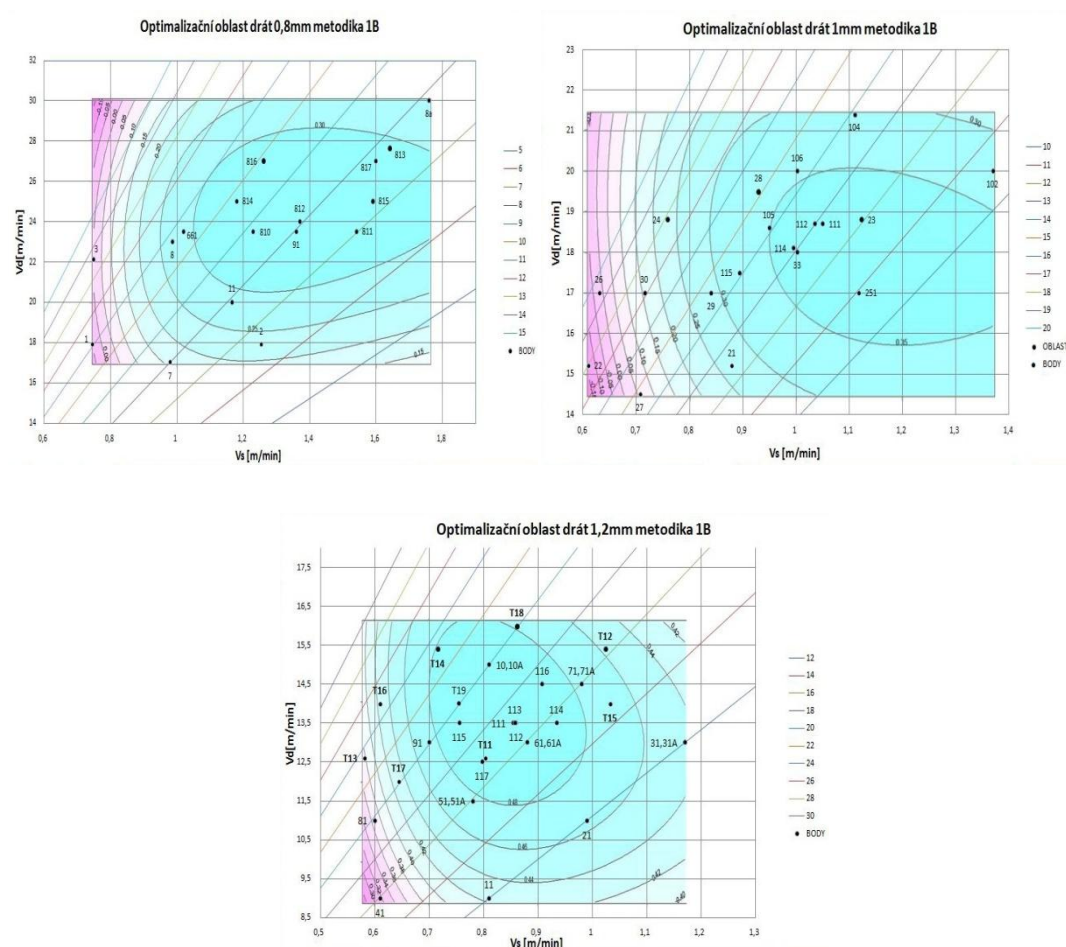
Tab.16

1A 1mm									
VZ	V _d	V _s	Z _{max}	V _{max}	P _N	V _t	PE	DE	FE
23	18,8	1,123	3,02	5,83	13,7	6,503	0,46438	0,80671	0,37462
111	18,7	1,050	3,16	5,80	13,0	6,535	0,48355	0,78224	0,37825
112	18,7	1,035	2,95	5,88	14,4	6,535	0,45141	0,81729	0,36894

Tab.17

1A 1,2mm									
VZ	V _d	V _s	Z _{max}	V _{max}	P _N	V _t	PE	DE	FE
T11	12,6	0,804	4,05	7,02	17,9	7,977	0,50770	0,75627	0,38396
112	13,5	0,860	4,60	7,74	18,0	8,189	0,56174	0,87494	0,49149
117	12,5	0,798	4,12	7,42	19,2	8,194	0,50281	0,81004	0,40730

4.2. Koncové porovnávací grafy pro metodiku 1B pro jednotlivé průměry drátů:



Obr.54 Srovnání grafů pole optimalizace pro metodiku 1B postupně dle průměru drátu tedy 0,8, 1, 1,2mm.

Tab.18

1B 0,8mm									
VZ	V _d	V _s	z _{max}	v _{max}	P _N	V _t	PE	DE	FE
811	23,5	1,54	1,71	3,95	7,6	4,354	0,39274	0,90722	0,3563
814	25,0	1,18	1,93	4,59	11,1	5,137	0,37567	0,89344	0,33564
815	25,0	1,59	1,7	3,85	8,0	4,418	0,38483	0,87152	0,33538

Tab.19

1B 1mm									
VZ	V _d	V _s	z _{max}	v _{max}	P _N	V _t	PE	DE	FE
23	18,8	1,123	3,02	5,83	13,7	6,503	0,46438	0,89647	0,4163
33	18,0	1,003	2,91	5,78	15,0	6,578	0,44236	0,87864	0,38868
251	17,0	1,118	2,61	5,24	12,1	5,905	0,44203	0,88745	0,39229

Tab.20

1B 1,2mm									
VZ	V _d	V _s	z _{max}	v _{max}	P _N	V _t	PE	DE	FE
T11	12,6	0,804	4,05	7,02	17,9	7,977	0,50770	0,88001	0,44678
113	13,5	0,858	4,97	8,28	19,7	9,023	0,55078	0,91761	0,50540
117	12,5	0,798	4,12	7,42	19,2	8,194	0,50281	0,90555	0,45533

Komentář

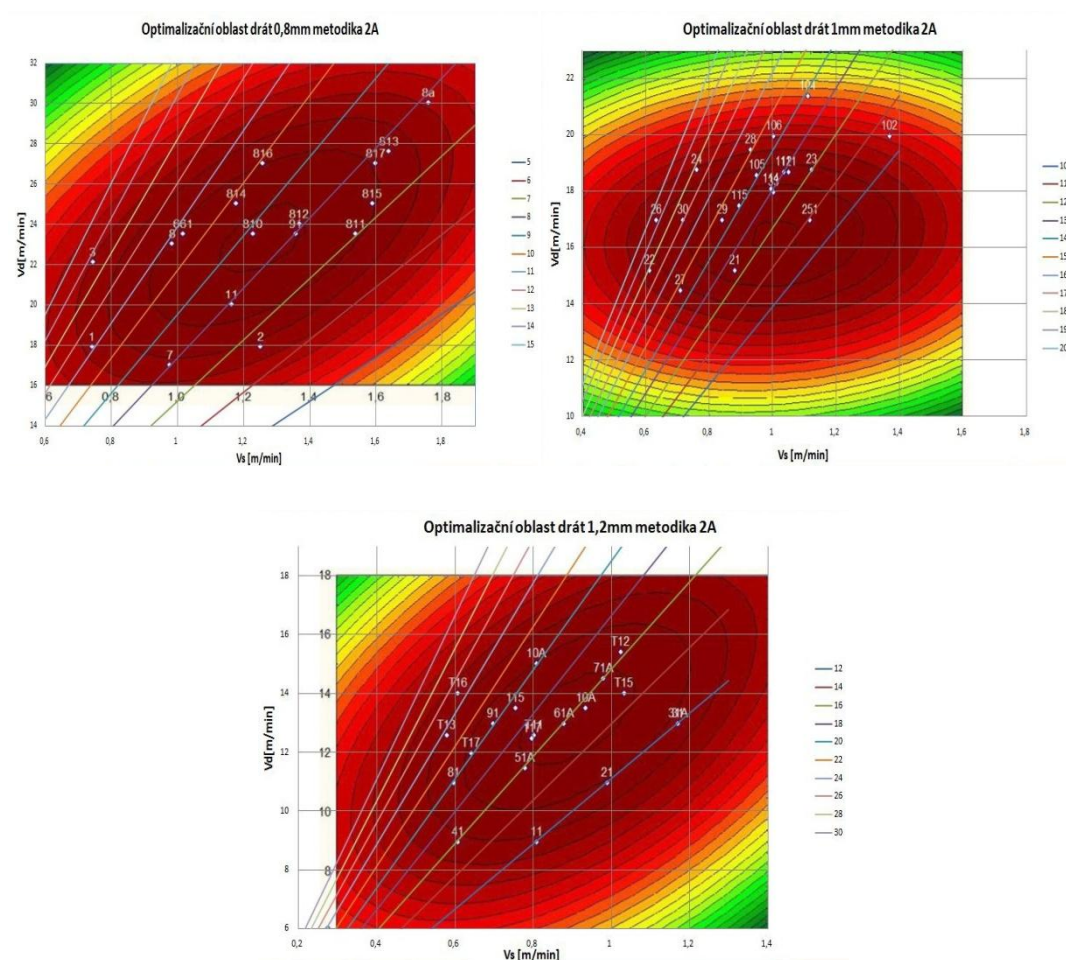
Podle metodiky 1A i 1B je oblast nejefektivnějšího provedení svaru pro drát 0,8mm pro koutové svary s účinnou výškou 4 až 4,5 mm a návarovou plochou kolem 8 mm², svary jsou tvarově méně stabilní, jsou náročné na přesnost geometrie dráhy hořáku. Produktivita je vysoká – rychlost svařování přes 1,2 m/min ale jakost nízká – kvalita 1 je téměř nedosažitelná.

Oblast nejefektivnějšího provedení svaru pro drát 1,0mm je pro koutové svary s účinnou výškou kolem 5,5 mm a návarovou plochou kolem 14 mm², svary jsou tvarově stabilnější a nejsou tak náročné na přesnost geometrie dráhy hořáku. Produktivita je též vysoká – rychlost svařování kolem 1,0 m/min a jakost se dá lépe zaručit – pro kvalitu 1 při nižších hodnotách rychlostí než pro kvalitu 3.

Oblast nejefektivnějšího provedení svaru pro drát 1,2mm je pro koutové svary s účinnou výškou kolem 7,5 mm a návarovou plochou kolem 17 mm², svary jsou tvarově stabilní nenáročné na přesnost geometrie dráhy hořáku. Produktivita – rychlost svařování je kolem 0,8 m/min a lze zaručit jakost 1 při

nižších a jakost 3 při vyšších parametrech svařování, protože tyto hranice (oblasti max. efektivity) jsou prokazatelně odděleny.

4.3. Koncové porovnávací grafy pro metodiku 2A pro jednotlivé průměry drátů:



Obr.55 Srovnání grafů pole optimalizace pro metodiku 2A postupně dle průměru drátu tedy 0,8, 1, 1,2mm.

Tab.21

2A 0,8mm													
VZ	Vd	Vs	x	v	P _N	c _v	b _v	V _t	α	z	PE	DE	FE
91	23,5	1,36	2,89	4,72	9,1	3,315	5,490	5,31	31°9'	3,377	0,544	0,694	0,378
810	23,5	1,23	2,78	4,54	10,3	3,593	5,750	5,40	32°4'	3,281	0,515	0,594	0,306
812	24,0	1,37	2,00	3,90	8,7	3,440	5,035	4,50	34°11'	2,418	0,445	0,712	0,317

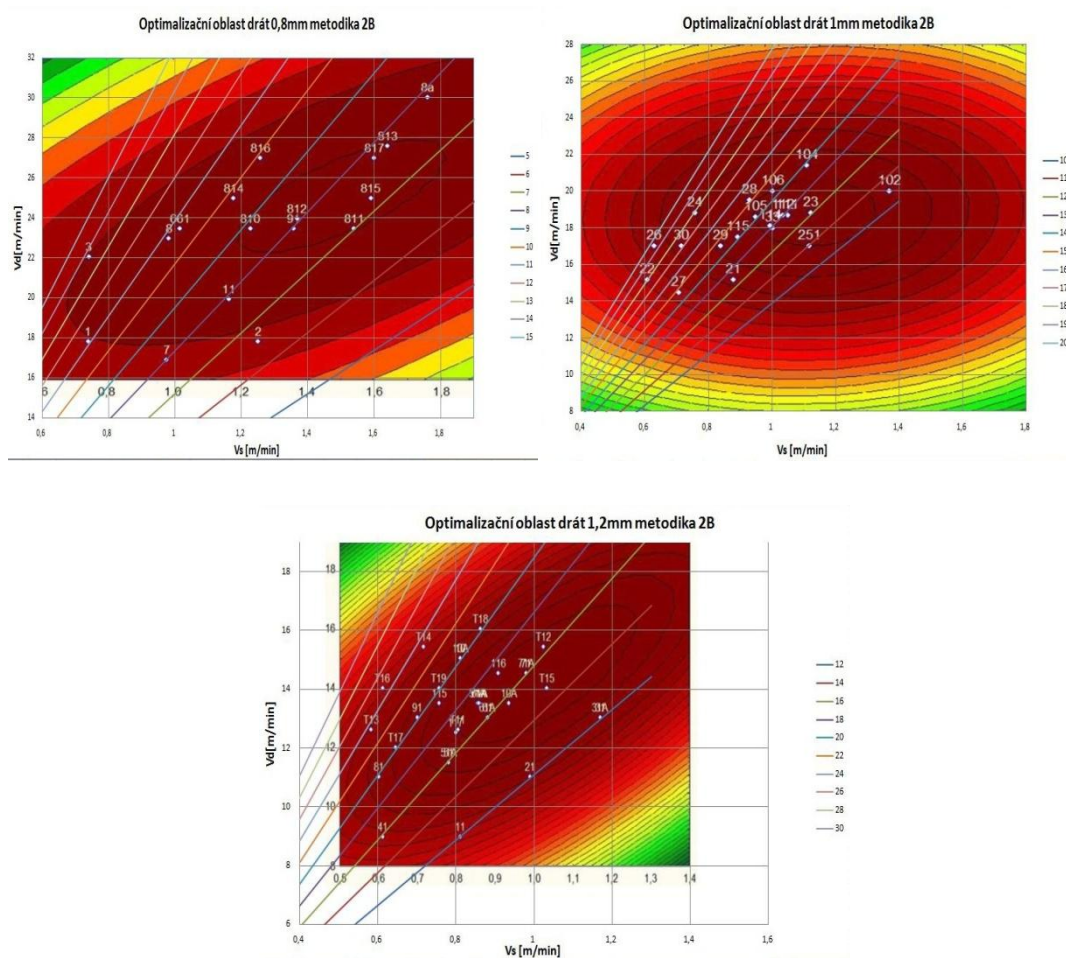
Tab.22

2A 1mm													
VZ	Vd	Vs	x	v	P _N	c _v	b _v	V _t	α	z	PE	DE	FE
29	17,0	0,841	3,15	5,90	16,9	4,701	7,190	6,57	33°10'	3,763	0,479	0,761	0,365
251	17,0	1,118	3,11	5,20	12,1	3,872	6,250	5,94	31°46'	3,658	0,524	0,677	0,355
115	17,5	0,894	3,28	5,73	15,8	4,488	7,041	6,55	32°30'	3,889	0,501	0,692	0,346

Tab.23

2A 1,2mm													
VZ	Vd	Vs	x	v	P _N	c _v	b _v	V _t	α	z	PE	DE	FE
T15	14,0	1,033	4,92	7,10	15,7	4,130	7,598	7,95	28°28'	5,597	0,619	0,639	0,395
61	13,0	0,880	3,71	6,17	16,4	4,490	7,305	6,99	31°34'	4,354	0,531	0,689	0,366
117	12,5	0,798	5,19	7,42	19,2	4,620	8,320	8,58	29°4'	5,938	0,605	0,561	0,340

4.4. Koncové porovnávací grafy pro metodiku 2B pro jednotlivé průměry drátů:



Obr.56 Srovnání grafů pole optimalizace pro metodiku 2B postupně dle průměru drátu tedy 0,8, 1, 1,2mm.

Tab.24

2B 0,8mm											
VZ	Vd	Vs	x	v	P _N	c _v	b _v	V _t	PE	DE	FE
810	23,5	1,23	2,78	4,54	10,3	3,593	5,750	5,40	0,515	0,841	0,433
812	24,0	1,37	2,00	3,90	8,7	3,440	5,035	4,50	0,445	0,867	0,385
815	25,0	1,59	2,14	3,83	8,0	3,241	4,937	4,50	0,476	0,851	0,405

Tab.25

2B 1mm											
VZ	Vd	Vs	x	v	P _N	c _v	b _v	V _t	PE	DE	FE
33	18,0	1,003	3,19	5,50	15,0	4,374	6,859	6,38	0,500	0,862	0,431
111	18,7	1,050	3,63	5,67	13,0	3,924	6,626	6,50	0,559	0,872	0,487
112	18,7	1,035	3,39	5,65	14,4	4,224	6,818	6,47	0,524	0,873	0,457

Tab.26

2B 1,2mm											
VZ	Vd	Vs	x	v	P _N	c _v	b _v	V _t	PE	DE	FE
T12	15,4	1,024	5,05	7,34	18,6	4,550	8,176	8,39	0,602	0,875	0,527
T15	14,0	1,033	4,92	7,10	15,7	4,130	7,598	7,95	0,619	0,893	0,553
61A	13,0	0,880	4,92	7,20	13,8	3,820	7,225	7,73	0,637	0,932	0,593

Komentář

Zhodnocení efektivity jednotlivých průměrů drátů podle metodiky 2A a 2B zvětšuje již uvedené rozdíly mezi jednotlivými dráty – drát 0,8mm se ukazuje pro technologii MAG s vysokou hustotou výkonu jako nevhodný, naopak drát 1,2mm potvrzuje použitelnost této technologie v praxi, protože požadovaná přesnost geometrie hořáku je dosažitelná současnými automatizovanými systémy a geometrie svarů je méně citlivá na přesnost nastavení parametrů svařování, což dává možnost volby produktivního svařování vysokou rychlostí při dodržení kvality 3 nebo bezpečné svařování v kvalitě 1 a 2.

4.5. Závěr:

Tato práce prokázala, že metoda 2, která byla vyvinuta pro praktické použití při optimalizaci soustav zdroj-drát-plyn je vhodná i pro dráty 0,8 a 1,0mm. Po počátečních problémech jsme docílili i u těchto drátů požadované přesnosti geometrie hořáku tak aby maximální hloubka závaru byla nasměrována do styčné plochy mezi pásnicí a stojnou, tak jak to vyžaduje praxe a metoda 2. Jiný problém je použitelnost těchto drátů pro metodu svařování MAG s vysokou hustotou výkonu (HiPen). Na jedné straně se potvrdil předpoklad, že každá soustava zdroj-drát-plyn má svoji specifickou oblast maximální efektivity provedení koutového svaru, nicméně se ukázalo, že efekt hlubokého závaru, který je dosažen souhrou fyzikálních podmínek při působení oblouku a přenosu kovu začíná působit až při určité hustotě výkonu, která pro tenké dráty vyžaduje nejen vysokou rychlost drátu, ale i rychlost svařování, která působí negativně na stabilitu tvaru návaru. Takže i když se i u drátu 0,8mm prokázal efekt hlubokého závaru a dokázali jsme jej i dostatečně přesně nasměrovat, bylo to až v rozsahu rychlostí svařování, při kterých byl svar zúžený a převýšený se sklonem k vytváření vrubů. Jak bylo již dříve prokázáno [4,8] pro uplatnění metody HiPen v praxi je nejvhodnější drát o průměru 1,2mm, případně i 1,0mm, které je zvládnutelné optimalizovat nejen laboratorní metodou 1, ale i náročnější metodou 2, vycházející z použití v praxi.

5. Seznam použité literatury:

- [1]. Kubíček: Technologie Výroby I, Teorie Svařování, pdf.
- [2]. Kuncipál, J., Dubenský, R., Dunovský, J., Pilous, V.: Teorie Svařování SNTL – Nakladatelství technické literatury, PRAHA 1986.
- [3]. Barták, J., Kudělka, V., Pilous, V., Trejtnar, J.: Svařování kovů v praxi.
- [4]. Hudec, Z.: Optimalizace konstrukčních a technologických parametrů koutových svarů zhotovených metodou MAG. [Disertační práce]. Liberec 2005.
- [5]. Hudec, Z., Hrstka, D.: ŘEŠENÍ NADMĚRNÉHO SVAŘOVÁNÍ KOUTOVÝCH SVARŮ METODOU MAG IIW International Congress in Central and East Europe Region Slovakia, High Tatras, October 2009,.
- [6]. HUDEC, Z.: Od “overweldingu“ k technologičnosti svařence. SDSM 3/2004.
- [7]. MYERS, R. H.: Response Surface Methodology, John Wiley & Sons Inc. N.Y. 1995.
- [8]. Tomášek, M.: Vliv ochranného plynu na kvalitu a produktivitu svařování MAG s vysokou hustotou výkonu [Diplomová práce] Liberec 2010.
- [9]. Hrstka, D.: Vliv směsi plynu na efektivitu provedení svaru a stabilitu procesu MAG. [Diplomová práce]. Liberec 2007. TU Liberec, FS.
- [10]. Hudec, Z., Hrstka, D.: “GMAW Fillet Weld Overwelding Solution“, First IIW Congress in Central and East European Region, Tatry, Stará Lesná, SK, 2009.
- [11]. Hudec, Z.: MAG svařování přeplátovaných plechů zdrojem SIGMA. Výzkumná zpráva pro fy. Migatronik, 2009.
- [12]. Furmaník, P.: Vliv přídavného materiálu na efektivitu provedení svaru a stabilitu procesu MAG. [Diplomová práce]. Liberec 2007. TU Liberec, FS.
- [13]. <http://www.svarak.cz/>
- [14]. <http://www.mmspektrum.com>
- [15]. <http://www.konstrukce.cz/>
- [16]. <http://www.welding.cz/>
- [17]. <http://www.esab.cz/cz/cz/education/processes-mig-gmaw.cfm>

[18]. <http://www.wikipedia.org>

[19]. Engindeniz, E.: Svařování metodou MAG plněnými dráty.(Omnitech)

[20]. <http://www.migatronic.cz>

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon

č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

Declaration:

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date:

Signature:

Příloha:

Základní tabulka č.1 získaných hodnot měřením pro drát o průměru 0,8mm:

VZ	V _d	V _s	I	U	CW	Q	P _M	x	x _{max}	c	b	a	z	z _{max}	v	v _{max}	p	w	β	e	α	P _n	P _s	D	f
1	17,9	0,75	234	24,7	9,0	4,0	11,0	1,28	1,28	3,93	5,16	3,11	0,78	0,78	3,97	3,97	0,60	6,4	128-127	0,63	39	12,4	18,0	0,311	14,9
2	17,9	1,25	234	24,4	9,0	2,3	6,6	1,05	1,05	3,18	3,84	2,43	0,8	0,8	3,24	3,24	0,46	4,9	130-140	0,62	40	7,3	11,5	0,362	18,8
3	22,1	0,75	271	25,2	9,5	4,7	13,6	1,94	1,94	4,05	5,13	3,17	1,54	1,54	4,17	4,17	1,17	6,5	128-129	1,20	38	14,1	21,8	0,353	17,3
7	17,0	0,98	227	24,4	9,0	2,9	8,0	1,21	1,21	3,39	4,06	2,62	0,91	0,91	3,54	3,54	0,41	5,3	130-133	0,80	39	8,2	13,1	0,374	17,8
8	23,0	0,99	282	25,3	9,0	3,7	10,7	2,13	2,13	3,87	4,92	3,04	1,7	1,7	4,75	4,75	1,04	6,2	121-130	1,30	37	12,6	19,7	0,361	20,3
11	20,0	1,17	246	24,7	9,5	2,7	7,9	1,24	1,24	3,22	4,5	2,63	1,01	1,01	3,65	3,65	0,54	5,6	118-143	0,74	33	8,8	13,7	0,358	19,4
8a	30	1,76	343	26,2	9	2,6	7,8	2,45	2,45	2,53	3,61	2,08	1,93	1,93	4,01	4,01	1,51	4,4	86-98	1,4	34	8,8	15,4	0,429	26,7
661	23,5	1,02	300	24,0	9,0	3,6	10,6	2,92	2,92	3,09	4,67	2,58	2,45	2,45	5,06	5,06	1,25	5,6	90-133	1,60	34	11,5	20,3	0,432	25,5
91	23,5	1,36	300	25,4	9	2,9	7,9	2,89	2,89	2,6	4,39	2,23	2,5	2,5	4,72	4,72	1,00	5,1	92-121	1,5	31	9,1	17,0	0,465	29,0
810	23,5	1,23	292	25,0	9	3,0	8,8	2,78	2,81	2,81	3,12	2,39	2,12	2,49	4,54	4,86	1,36	4,9	89-100	1,80	41	10,3	18,3	0,436	27,7
811	23,5	1,54	289	25,5	9	2,4	7,0	2,03	2,03	3,00	3,27	2,21	1,47	1,71	3,70	3,95	0,93	4,4	107-105	1,36	42	7,6	14,0	0,457	27,4
812	24,0	1,37	296	25,3	9	2,8	8,1	2,00	2,17	3,46	3,53	2,48	1,42	2,14	3,90	4,61	0,86	4,9	122-106	1,42	45	8,7	16,1	0,463	28,1
813	27,6	1,64	294	25,1	9	2,3	7,7	2,10	2,22	2,56	3,49	2,10	1,68	1,68	3,80	3,80	1,02	4,3	95-108	1,24	35	7,2	13,3	0,460	28,0
814	25,0	1,18	287	25,6	9	3,2	9,7	2,26	2,26	3,54	4,06	2,67	1,72	1,93	4,38	4,59	1,35	5,4	114-111	1,5	41	11,1	17,8	0,376	22,2
815	25,0	1,59	293	25,3	9	2,4	7,2	2,14	2,2	2,73	3,5	2,14	1,68	1,7	3,83	3,85	1,13	4,5	92-104	1,29	38	8,0	13,6	0,412	24,7
816	27,0	1,26	286	25,7	9	3,0	9,9	1,23	1,54	3,67	4,7	2,92	0,93	0,99	3,84	3,94	0,67	6	128-139	0,73	38	10,4	15,3	0,320	17,3
817	27,0	1,60	300	25,6	9	2,4	7,8	2,1	2,11	2,59	2,83	1,91	1,53	1,9	3,43	3,8	1,45	3,8	86-74	1,43	43	9,8	14,0	0,30	18,0

Tabulka č. 2 a č.3 konečná tabulka hodnot pro metodiku 1A a 1B drát 0,8mm:

1A

1B

VZ	V _d	V _s	Z _{max}	V _{max}	P _N	V _t	PE	DE	FE	DE	FE
1	17,9	0,75	0,78	3,97	12,4	4,271	0,18262	0,91373	0,16686	0,92948	0,16974
2	17,9	1,25	0,8	3,24	7,3	3,466	0,23081	0,9152	0,21123	0,93477	0,21575
3	22,1	0,75	1,54	4,17	14,1	5,210	0,29558	0,71662	0,21182	0,80038	0,23658
7	17,0	0,98	0,91	3,54	8,2	3,731	0,24392	0,9324	0,22743	0,94889	0,23146
8	23,0	0,99	1,7	4,75	12,6	5,149	0,33019	0,88443	0,29203	0,92259	0,30463
11	20,0	1,17	1,01	3,65	8,8	3,927	0,25721	0,90513	0,23281	0,92953	0,23909
8a	30	1,76	1,93	4,01	8,8	4,767	0,40489	0,73323	0,29687	0,84124	0,34061
661	23,5	1,02	2,45	5,06	11,5	5,670	0,43206	0,81044	0,35016	0,89234	0,38555
91	23,5	1,36	2,5	4,72	9,1	5,335	0,46857	0,78297	0,36688	0,88466	0,41453
810	23,5	1,23	2,49	4,86	10,3	5,522	0,45092	0,78164	0,35245	0,8801	0,39685
811	23,5	1,54	1,71	3,95	7,6	4,354	0,39274	0,84721	0,33274	0,90722	0,3563
812	24,0	1,37	2,14	4,61	8,7	4,940	0,43317	0,88204	0,38207	0,93313	0,4042
813	27,6	1,64	1,68	3,80	7,2	4,252	0,3951	0,82424	0,32566	0,89368	0,35309
814	25,0	1,18	1,93	4,59	11,1	5,137	0,37567	0,82931	0,31155	0,89344	0,33564
815	25,0	1,59	1,7	3,85	8,0	4,418	0,38483	0,79114	0,30445	0,87152	0,33538
816	27,0	1,26	0,99	3,94	10,4	4,169	0,23748	0,92801	0,22038	0,94511	0,22444
817	27,0	1,60	1,9	3,8	9,8	4,906	0,38728	0,63206	0,24479	0,77456	0,29997
						z Rgui					

Pro získání hodnoty V_t. byl použit program R-gui.

Tabulka č. 4 konečná tabulka hodnot pro metodiku 2A drát 0,8mm:

VZ	Vd	Vs	x	v	P _N	c _v	b _v	V _t	α	z	PE	DE	FE
1	17,9	0,75	1,28	3,97	12,4	4,445	5,579	4,48	38°30′	1,636	0,286	0,821	0,235
2	17,9	1,25	1,05	3,24	7,3	3,387	4,311	3,49	38°8′	1,335	0,301	0,884	0,266
3	22,1	0,75	1,94	4,17	14,1	4,552	6,195	5,23	36°19′	2,408	0,371	0,624	0,231
7	17,0	0,98	1,21	3,54	8,2	3,557	4,611	3,77	37°44′	1,530	0,321	0,896	0,287
8	23,0	0,99	2,13	4,75	12,6	4,216	5,977	5,19	35°7′	2,604	0,411	0,831	0,341
11	20,0	1,17	1,24	3,65	8,8	3,690	4,770	3,90	37°42′	1,567	0,318	0,893	0,284
8a	30	1,76	2,45	4,01	8,8	3,349	5,255	4,89	32°30′	2,905	0,501	0,557	0,279
661	23,5	1,02	2,92	5,06	11,5	3,800	6,063	5,69	32°8′	3,448	0,513	0,719	0,369
91	23,5	1,36	2,89	4,72	9,1	3,315	5,490	5,31	31°9′	3,377	0,544	0,694	0,378
810	23,5	1,23	2,78	4,54	10,3	3,593	5,750	5,40	32°4′	3,281	0,515	0,594	0,306
811	23,5	1,54	2,03	3,70	7,6	3,173	4,778	4,34	33°28′	2,433	0,468	0,665	0,311
812	24,0	1,37	2,00	3,90	8,7	3,440	5,035	4,50	34°11′	2,418	0,445	0,712	0,317
813	27,6	1,64	2,10	3,80	7,2	3,060	4,680	4,33	32°56′	2,502	0,485	0,711	0,345
814	25,0	1,18	2,26	4,38	11,1	3,885	5,714	5,08	34°14′	2,734	0,445	0,701	0,312
815	25,0	1,59	2,14	3,83	8,0	3,241	4,937	4,50	33°15′	2,559	0,476	0,655	0,312
816	27,0	1,26	1,23	3,84	10,4	4,050	5,136	4,15	38°11′	1,565	0,297	0,882	0,262
817	27,0	1,60	2,1	3,43	9,8	3,657	5,360	4,76	34°13′	2,540	0,442	0,402	0,177
						z derive							

Potřebná hodnota C_v byla pro metodiku 2A i 2B získána pomocí programu Derive v6.

Tabulka č. 5 konečná tabulka hodnot pro metodiku 2B drát 0,8mm:

VZ	Vd	Vs	x	v	P _N	c _v	b _v	V _t	PE	DE	FE
1	17,9	0,75	1,28	3,97	12,4	4,445	5,579	4,48	0,286	0,887	0,253
2	17,9	1,25	1,05	3,24	7,3	3,387	4,311	3,49	0,301	0,929	0,279
3	22,1	0,75	1,94	4,17	14,1	4,552	6,195	5,23	0,371	0,797	0,296
7	17,0	0,98	1,21	3,54	8,2	3,557	4,611	3,77	0,321	0,938	0,301
8	23,0	0,99	2,13	4,75	12,6	4,216	5,977	5,19	0,411	0,916	0,376
11	20,0	1,17	1,24	3,65	8,8	3,690	4,770	3,90	0,318	0,936	0,298
8a	30	1,76	2,45	4,01	8,8	3,349	5,255	4,89	0,501	0,820	0,411
661	23,5	1,02	2,92	5,06	11,5	3,800	6,063	5,69	0,513	0,889	0,456
91	23,5	1,36	2,89	4,72	9,1	3,315	5,490	5,31	0,544	0,889	0,483
810	23,5	1,23	2,78	4,54	10,3	3,593	5,750	5,40	0,515	0,841	0,433
811	23,5	1,54	2,03	3,70	7,6	3,173	4,778	4,34	0,468	0,853	0,399
812	24,0	1,37	2,00	3,90	8,7	3,440	5,035	4,50	0,445	0,867	0,385
813	27,6	1,64	2,10	3,80	7,2	3,060	4,680	4,33	0,485	0,878	0,426
814	25,0	1,18	2,26	4,38	11,1	3,885	5,714	5,08	0,445	0,862	0,383
815	25,0	1,59	2,14	3,83	8,0	3,241	4,937	4,50	0,476	0,851	0,405
816	27,0	1,26	1,23	3,84	10,4	4,050	5,136	4,15	0,297	0,926	0,275
817	27,0	1,60	2,1	3,43	9,8	3,657	5,360	4,76	0,442	0,721	0,318
						z derive					

Potřebná hodnota C_v byla pro metodiku 2A i 2B získána pomocí programu Derive v6.

Základní tabulka č.6 získaných hodnot měřením pro drát o průměru 1mm:

VZ	Vd	Vs	I	U	CW	Q	P _M	x	x _{max}	c	b	a	z	z _{max}	v	v _{max}	p	w	β	e	α	Pn	Ps
21	15,2	0,880	293	26,4	12,5	4,4	12,4	2,53	2,53	4,16	5,41	3,29	2,01	2,08	5,30	5,39	0,97	6,7	122-122	1,6	37,0	14,6	25,6
22	15,2	0,610	295	26,6	13,5	6,5	17,9	2,27	3,28	4,48	6,94	3,77	1,88	2,19	5,70	6,00	1,16	8,2	130-110	1,2	33,0	20,9	34,2
23	18,8	1,123	347	27,1	12,5	4,2	12,1	3,11	3,21	3,57	4,56	2,82	2,45	3,02	5,30	5,83	1,55	5,8	103-102	1,9	39,0	13,7	24,9
24	18,8	0,759	338	27,2	13,0	6,1	17,8	3,56	3,63	4,44	5,69	3,51	2,81	3,32	6,30	6,84	2,03	7,3	102-100	2,2	38,0	21,7	35,9
26	17,0	0,631	316	27,0	13,0	6,8	19,4	3,17	3,19	4,44	6,80	3,72	2,64	2,66	6,40	6,43	1,53	8,1	144-120	1,7	33,0	20,9	34,4
27	14,5	0,708	289	26,4	12,5	5,4	14,7	2,54	2,78	4,49	6,33	3,68	2,06	2,19	5,70	5,85	0,83	7,8	137-119	1,5	35,0	17,7	29,0
28	19,5	0,930	344	27,4	12,5	5,1	15,1	3,37	3,51	4,00	5,11	3,14	2,66	3,12	5,80	6,28	1,83	6,5	106-101	2,1	40,0	17,3	29,9
29	17,0	0,841	316	27,0	12,5	5,1	14,6	3,15	3,26	4,11	5,74	3,35	2,52	2,57	5,90	6,40	1,29	7,1	119-106	1,8	36,0	16,9	29,5
30	17,0	0,716	317	26,9	13,0	6,0	17,1	3,32	3,48	4,46	6,32	3,64	2,68	2,68	6,40	6,40	1,20	7,7	119-103	1,9	36,0	19,7	31,1
33	18,0	1,003	329	27,0	12,5	4,5	12,9	3,19	3,23	3,48	5,07	2,88	2,64	2,91	5,50	5,78	1,63	6,2	106-92	1,8	36,0	15,0	27,0
251	17,0	1,118	330	26,7	12,0	4,0	10,9	3,11	3,11	3,13	4,79	2,62	2,61	2,61	5,20	5,24	1,34	5,7	118-92	1,7	36,0	12,1	23,5
102	20,0	1,370	370	27,0	12,5	3,7	10,5	3,15	3,26	3,44	4,09	2,65	2,42	2,42	5,06	5,06	1,43	5,3	89-94	2,0	41,0	12,3	22,1
104	21,4	1,111	374	27,6	12,5	4,7	13,9	3,94	4,04	3,00	5,07	2,57	3,37	3,37	5,96	5,96	2,38	5,9	71-99	2,0	31,0	17,1	30,1
105	18,6	0,950	351	26,9	12,5	5,0	14,1	3,72	3,72	3,59	5,21	2,96	3,08	3,20	6,05	6,16	1,70	6,4	92-105	2,1	35,0	16,2	29,4
106	20,0	1,003	376	27,3	12,5	5,2	14,4	3,96	3,96	3,94	5,30	3,15	3,17	3,17	6,35	6,35	1,76	6,5	101-98	2,4	36,0	17,6	30,8
111	18,7	1,050	352	27,2	12,5	4,6	12,8	3,63	3,63	3,14	4,80	2,64	3,02	3,16	5,67	5,80	1,54	5,7	104-91	2,0	34,0	13,0	25,2
112	18,7	1,035	346	27,0	12,5	4,5	13,0	3,39	3,39	3,68	4,89	2,97	2,67	2,95	5,65	5,88	1,48	6,2	106-103	2,1	37,0	14,4	25,7
114	18,1	0,995	337	26,9	12,5	4,6	13,1	3,28	3,38	3,71	4,67	2,91	2,56	3,08	5,45	5,99	1,38	6,0	104-107	2,0	38,0	13,4	24,6
115	17,5	0,894	332	26,7	12,5	5,0	14,1	3,28	3,28	3,90	5,18	3,13	2,62	3,04	5,73	6,20	1,57	6,4	108-104	2,0	37,0	15,8	28,5

Tabulka č. 7 a č.8 konečná tabulka hodnot pro metodiku 1A a 1B drát 1mm: 1A

1B

VZ	V _d	V _s	z _{max}	v _{max}	P _N	V _t	PE	DE	FE
21	15,2	0,880	2,08	5,39	14,6	5,768	0,36059	0,89743	0,3236
22	15,2	0,610	2,19	6,00	20,9	6,556	0,33407	0,87273	0,29155
23	18,8	1,123	3,02	5,83	13,7	6,503	0,46438	0,80671	0,37462
24	18,8	0,759	3,32	6,84	21,7	7,748	0,42847	0,79486	0,34058
26	17	0,631	2,66	6,43	20,9	6,972	0,38155	0,87438	0,33361
27	14,5	0,708	2,19	5,85	17,7	6,240	0,35094	0,90361	0,31711
28	19,5	0,930	3,12	6,28	17,3	7,060	0,44194	0,80206	0,35446
29	17,0	0,841	2,57	6,40	16,9	6,512	0,39466	0,9716	0,38345
30	17,0	0,716	2,68	6,40	19,7	6,910	0,38785	0,87946	0,3411
33	18,0	1,003	2,91	5,78	15,0	6,578	0,44236	0,78237	0,34609
251	17,0	1,118	2,61	5,24	12,1	5,905	0,44203	0,79829	0,35287
102	20,0	1,370	2,42	5,06	12,3	5,761	0,42006	0,79017	0,33192
104	21,4	1,111	3,37	5,96	17,1	7,262	0,46405	0,66544	0,3088
105	18,6	0,950	3,20	6,16	16,2	6,996	0,45742	0,77981	0,3567
106	20,0	1,003	3,17	6,35	17,62	7,142	0,44387	0,80066	0,35539
111	18,7	1,050	3,16	5,80	13,0	6,535	0,48355	0,78224	0,37825
112	18,7	1,035	2,95	5,88	14,4	6,535	0,45141	0,81729	0,36894
114	18,1	0,995	3,08	5,99	13,4	6,516	0,47265	0,84682	0,40025
115	17,5	0,894	3,04	6,20	15,8	6,800	0,44707	0,84046	0,37575
						z Rgui			

DE	FE
0,93441	0,33694
0,91525	0,30575
0,89647	0,4163
0,88276	0,37824
0,92231	0,3519
0,93743	0,32898
0,88954	0,39312
0,98281	0,38787
0,92621	0,35923
0,87864	0,38868
0,88745	0,39229
0,87831	0,36895
0,8207	0,38084
0,88053	0,40277
0,88914	0,39467
0,88754	0,42917
0,89977	0,40617
0,91922	0,43447
0,91179	0,40763

Pro získání hodnoty V_t byl použit program R-gui.

Tabulka č. 9 konečná tabulka hodnot pro metodiku 2A drát 1mm:

VZ	Vd	Vs	x	v	P _N	c _v	b _v	V _t	α	z	PE	DE	FE
21	15,2	0,880	2,53	5,30	14,6	4,472	6,530	5,78	34°21′	3,064	0,438	0,824	0,361
22	15,2	0,610	2,27	5,70	20,9	5,570	7,504	6,30	36°35′	2,827	0,361	0,828	0,299
23	18,8	1,123	3,11	5,30	13,7	4,166	6,577	6,15	32°20′	3,681	0,506	0,657	0,332
24	18,8	0,759	3,56	6,30	21,7	5,329	8,144	7,44	33°11′	4,254	0,479	0,643	0,308
26	17,0	0,631	3,17	6,40	20,9	5,313	7,867	7,03	34°1′	3,824	0,451	0,803	0,362
27	14,5	0,708	2,54	5,70	17,7	4,992	7,091	6,16	35°8′	3,106	0,412	0,850	0,350
28	19,5	0,930	3,37	5,80	17,3	4,711	7,345	6,80	32°40′	4,003	0,495	0,642	0,318
29	17,0	0,841	3,15	5,90	16,9	4,701	7,190	6,57	33°10′	3,763	0,479	0,761	0,365
30	17,0	0,716	3,32	6,40	19,7	5,095	7,733	7,03	33°22′	3,975	0,472	0,795	0,375
33	18,0	1,003	3,19	5,50	15,0	4,374	6,859	6,38	32°31′	3,783	0,500	0,662	0,331
251	17,0	1,118	3,11	5,20	12,1	3,872	6,250	5,94	31°46′	3,658	0,524	0,677	0,355
102	20,0	1,370	3,15	5,06	12,3	3,900	6,282	6,00	31°43′	3,703	0,525	0,592	0,311
104	21,4	1,111	3,94	5,96	17,1	4,549	7,496	7,26	31°10′	4,605	0,542	0,510	0,277
105	18,6	0,950	3,72	6,05	16,2	4,453	7,280	6,97	31°27′	4,361	0,534	0,647	0,345
106	20,0	1,003	3,96	6,35	17,62	4,626	7,618	7,34	31°16′	4,633	0,540	0,635	0,342
111	18,7	1,050	3,63	5,67	13,0	3,924	6,626	6,50	30°38′	4,219	0,559	0,636	0,355
112	18,7	1,035	3,39	5,65	14,4	4,224	6,818	6,47	31°46′	3,987	0,524	0,669	0,350
114	18,1	0,995	3,28	5,45	13,4	4,073	6,580	6,25	31°45′	3,857	0,525	0,665	0,349
115	17,5	0,894	3,28	5,73	15,8	4,488	7,041	6,55	32°30′	3,889	0,501	0,692	0,346
						z derive							

Potřebná hodnota C_v byla pro metodiku 2A i 2B získána pomocí programu Derive v6.

Tabulka č. 10 konečná tabulka hodnot pro metodiku 2B drát 1mm:

VZ	Vd	Vs	x	v	P _N	c _v	b _v	V _t	PE	DE	FE
21	15,2	0,880	2,53	5,30	14,6	4,472	6,530	5,78	0,438	0,917	0,402
22	15,2	0,610	2,27	5,70	20,9	5,570	7,504	6,30	0,361	0,905	0,326
23	18,8	1,123	3,11	5,30	13,7	4,166	6,577	6,15	0,506	0,862	0,436
24	18,8	0,759	3,56	6,30	21,7	5,329	8,144	7,44	0,479	0,847	0,405
26	17,0	0,631	3,17	6,40	20,9	5,313	7,867	7,03	0,451	0,910	0,410
27	14,5	0,708	2,54	5,70	17,7	4,992	7,091	6,16	0,412	0,926	0,382
28	19,5	0,930	3,37	5,80	17,3	4,711	7,345	6,80	0,495	0,853	0,422
29	17,0	0,841	3,15	5,90	16,9	4,701	7,190	6,57	0,479	0,898	0,430
30	17,0	0,716	3,32	6,40	19,7	5,095	7,733	7,03	0,472	0,911	0,430
33	18,0	1,003	3,19	5,50	15,0	4,374	6,859	6,38	0,500	0,862	0,431
251	17,0	1,118	3,11	5,20	12,1	3,872	6,250	5,94	0,524	0,876	0,459
102	20,0	1,370	3,15	5,06	12,3	3,900	6,282	6,00	0,525	0,844	0,443
104	21,4	1,111	3,94	5,96	17,1	4,549	7,496	7,26	0,542	0,821	0,445
105	18,6	0,950	3,72	6,05	16,2	4,453	7,280	6,97	0,534	0,868	0,463
106	20,0	1,003	3,96	6,35	17,62	4,626	7,618	7,34	0,540	0,865	0,467
111	18,7	1,050	3,63	5,67	13,0	3,924	6,626	6,50	0,559	0,872	0,487
112	18,7	1,035	3,39	5,65	14,4	4,224	6,818	6,47	0,524	0,873	0,457
114	18,1	0,995	3,28	5,45	13,4	4,073	6,580	6,25	0,525	0,872	0,457
115	17,5	0,894	3,28	5,73	15,8	4,488	7,041	6,55	0,501	0,875	0,438
						z derive					

Potřebná hodnota C_v byla pro metodiku 2A i 2B získána pomocí programu Derive v6.